

Eine Zusammenstellung des Inhaltes der Hefte 1 bis 100 der Mitteilungen über Forschungsarbeiten zugleich mit einem Namen- und Sachverzeichnis wird auf Wunsch kostenfrei von der Redaktion der Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, Berlin N.W., Charlottenstr. 43, abgegeben.

Heft 101. Hanbel: Versuche an einer Dreifach-Expansions-Dampfmaschine.

Heft 102. Ellon: Versuche zur Bestimmung der Strömung im Laufrad und Saugrohr einer Francis-Schnelläuferturbine.

Versuche mit Dampfentölnern, durchgeführt in der dampftechnischen Versuchsanstalt des Bayerischen Revisionsvereines in München.

Bezugsbedingungen:

Preis des Heftes 1 Mk;

(zu beziehen durch Julius Springer, Berlin N. 24)

für Lehrer und Schüler technischer Schulen 50 Pfg

(zu beziehen gegen Voreinsendung des Betrages vom Verein deutscher Ingenieure, Berlin N.W. 7, Charlottenstraße 43).

Literarische Unternehmungen d. Vereines deutscher Ingenieure:

ZEITSCHRIFT DES VEREINES DEUTSCHER INGENIEURE.

Redakteur: D. Meyer.

Berlin N.W., Charlottenstraße 43

Geschäftstunden 9 bis 4 Uhr.

Expedition und Kommissionsverlag: Julius Springer, Berlin N., Monbijou-Platz 3.

Die Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure erscheint wöchentlich Sonnabends. Je einmal im Monat liegt ihr die Zeitschrift „Technik und Wirtschaft“ bei. Preis bei Bezug durch Buchhandel und Post 40 \mathcal{M} jährlich; einzelne Nummern werden gegen Einsendung von je 1.30 \mathcal{M} — nach dem Ausland von je 1.60 \mathcal{M} — portofrei geliefert.

Anzeigen:

Das Millimeter Höhe einer Spalte kostet 25 Pf.
Bei 6, 13, 26, 52 maliger Wiederholung im Laufe eines Jahres: 10, 20, 30, 40 vH Nachlaß.
Für Stellengesuche von Vereinsmitgliedern, die unmittelbar bei der Annahmestelle, Monbijou-Platz 3, aufgegeben und vorausbezahlt werden, kostet das Millimeter Höhe einer Spalte nur 12 Pf.

Beilagen:

Preis und erforderliche Anzahl sind unter Einsendung eines Musters bei der Expedition zu erfragen. Die Beilagen sind frei Berlin zu liefern.

Den Einsendern von Ziffer-Anzeigen wird für Annahme und freie Zusendung einlaufender Angebote mindestens 1 \mathcal{M} berechnet.

Bei Bewerbungen um Stellen, die ohne Namen ausgeschrieben sind, empfiehlt es sich nicht, Original-Zeugnisse beizufügen; die Expedition kann sich um die Wiedererlangung der beigefügten Zeugnisse, Zeugnis-Abschriften, Photographien, Zeichnungen usw. nicht bemühen und muß jede Verantwortung in dieser Beziehung ablehnen; ihre Tätigkeit beschränkt sich auf die Annahme und Weiterbeförderung der Angebote.

Schluß der Anzeigen-Annahme: Montag Vorm.; für Stellengesuche: Montag Abend 7 Uhr.

TECHNIK UND WIRTSCHAFT.

MONATSSCHRIFT DES VEREINES DEUTSCHER INGENIEURE.

REDAKTEUR: D. MEYER.

IN KOMMISSION BEI JULIUS SPRINGER BERLIN.

Bezugsbedingungen: Die »Technik und Wirtschaft« liegt der ganzen Auflage der Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure (Preis des Jahrgangs 40 \mathcal{M}) allmonatlich bei. Sie ist außerdem für 8 \mathcal{M} für den Jahrgang durch alle Buchhandlungen und Postanstalten sowie durch die Verlagsbuchhandlung von Julius Springer zu beziehen.

Anzeigen: Die ganze Seite 100 \mathcal{M} , $\frac{1}{2}$ Seite 50 \mathcal{M} , $\frac{1}{4}$ Seite 25 \mathcal{M} , $\frac{1}{8}$ Seite 12,50 \mathcal{M} . Ein kleinerer Raum als $\frac{1}{8}$ Seite wird nicht abgegeben. Bei 3 6 12 maliger Wiederholung im Jahre. **Beilagen:** Preis und erforderliche Anzahl sind unter Einsendung eines Musters bei der Verlagsbuchhandlung von Julius Springer zu erfragen. Auflage des Blattes 27000.

Mitteilungen
über
Forschungsarbeiten

auf dem Gebiete des Ingenieurwesens

insbesondere aus den Laboratorien
der technischen Hochschulen

herausgegeben vom

Verein deutscher Ingenieure.

Heft 103.



1911
Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

ISBN 978-3-662-01715-9 ISBN 978-3-662-02010-4 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-02010-4

Inhalt.

	Seite
Ueber den Einfluß der flüchtigen Bestandteile fester Brennstoffe auf den Wirkungsgrad von Kesselanlagen mit Innenfeuerung. Von E. J. Constam und P. Schläpfer	1

Ueber den Einfluß der flüchtigen Bestandteile fester Brennstoffe auf den Wirkungsgrad von Kesselanlagen mit Innenfeuerung.

Feuerungstechnische Studien von Prof. Dr. **E. J. Constam**, Direktor, und Dr. **P. Schläpfer**, Adjunkt der Prüfungsanstalt für Brennstoffe am Eidgenössischen Polytechnikum in Zürich.

I. Einleitung.

Zahlreiche, an verschiedenen Orten veröffentlichte Untersuchungen¹⁾ von Steinkohlen mittels der kalorimetrischen Bombe haben ergeben, daß im allgemeinen Kohlen, deren Gehalt an flüchtigen Bestandteilen ungefähr 16 bis 23 vH beträgt, bezogen auf brennbare Substanz, die höchste Verbrennungswärme und den höchsten Heizwert besitzen. Diese Tatsache wurde durch die Ergebnisse der kalorimetrischen Heizwertbestimmung von über 10 000 Kohlen- und Brikettproben, die in den letzten sechs Jahren hier untersucht worden sind, bestätigt, wobei aber auch Ausnahmen von der allgemeinen Regel vorkamen. Da die bei der Verbrennung auf dem Rost entwickelte Wärme sich aus der Verbrennungswärme sowohl der nicht flüchtigen wie der flüchtigen Bestandteile der Brennstoffe zusammensetzt, haben wir uns seit mehreren Jahren damit befaßt, zu ermitteln, in welchem Verhältnis bei den verschiedenen Kohlentypen, die man nach ihrem Gehalt an flüchtigen Bestandteilen und der Beschaffenheit des Verkokungsrückstandes unterscheidet (Anthrazit, Mager-, Fett-, Flammkohlen und Braunkohlen), die Verbrennungswärme der fixen Bestandteile (der Koks) zu derjenigen der flüchtigen Bestandteile (des Gases sowie der gasförmigen Anteile des Teeres und Peches) steht.

Zu diesem Behufe haben wir in der für unsre Zwecke abgeänderten Versuchsvorrichtung (von Nicolas & Chamon) des Schweizerischen Vereines von Gas- und Wasserfachmännern ausgesuchte, den verschiedenen Kohlengattungen angehörende Kohlenproben entgast und die Verbrennungswärme der erhaltenen Entgasungsergebnisse (Koks, Pech, Teer und Gas) mit derjenigen der zur Entgasung benutzten Kohle²⁾ verglichen. Ferner haben wir eine große Anzahl von Proben der verschie-

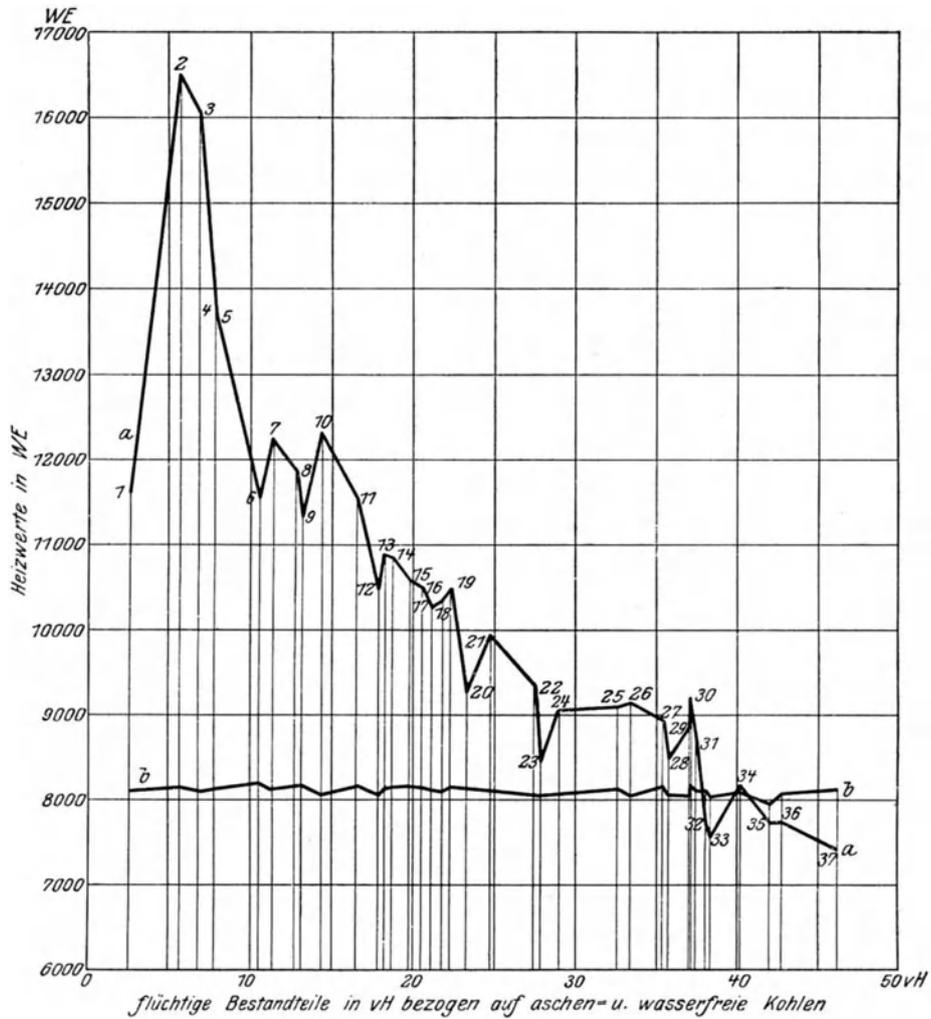
¹⁾ Bunte, Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung 1900 S. 640; Langbein, Zeitschrift für angewandte Chemie 1900; Mahler, Études sur les combustibles 1903 S. 59; Report on the operation of the Coal Testing Plant of the U. S. Geological Survey, Teil I S. 162, Washington 1900; Bericht des Vereines für Feuerungsbetrieb und Rauchbekämpfung in Hamburg 1907 S. 46; Mohr, Wochenschrift für Brauerei, 24. Jahrg. S. 412, 25. Jahrg. S. 179.

²⁾ Constam und Schläpfer, Journal für Gasbel. und Wasservers. 1906 S. 741 u. f.; Constam und Kolbe, Journal für Gasbel. und Wasservers. 1908 S. 669, 1909 S. 770 u. f.

denen Kohlsorten im Platintiegel verkocht und durch Abzug der bei den Verkokungsrückständen beobachteten Verbrennungswärme von derjenigen der untersuchten Kohle die Verbrennungswärme der flüchtigen Bestandteile ermittelt¹⁾. Durch Um-

Fig. 1.

Linie a: Verbrennungswärmen von 1 g der flüchtigen Bestandteile.
Linie b: Verbrennungswärmen von 1 g der aschen- und wasserfreien Koks.

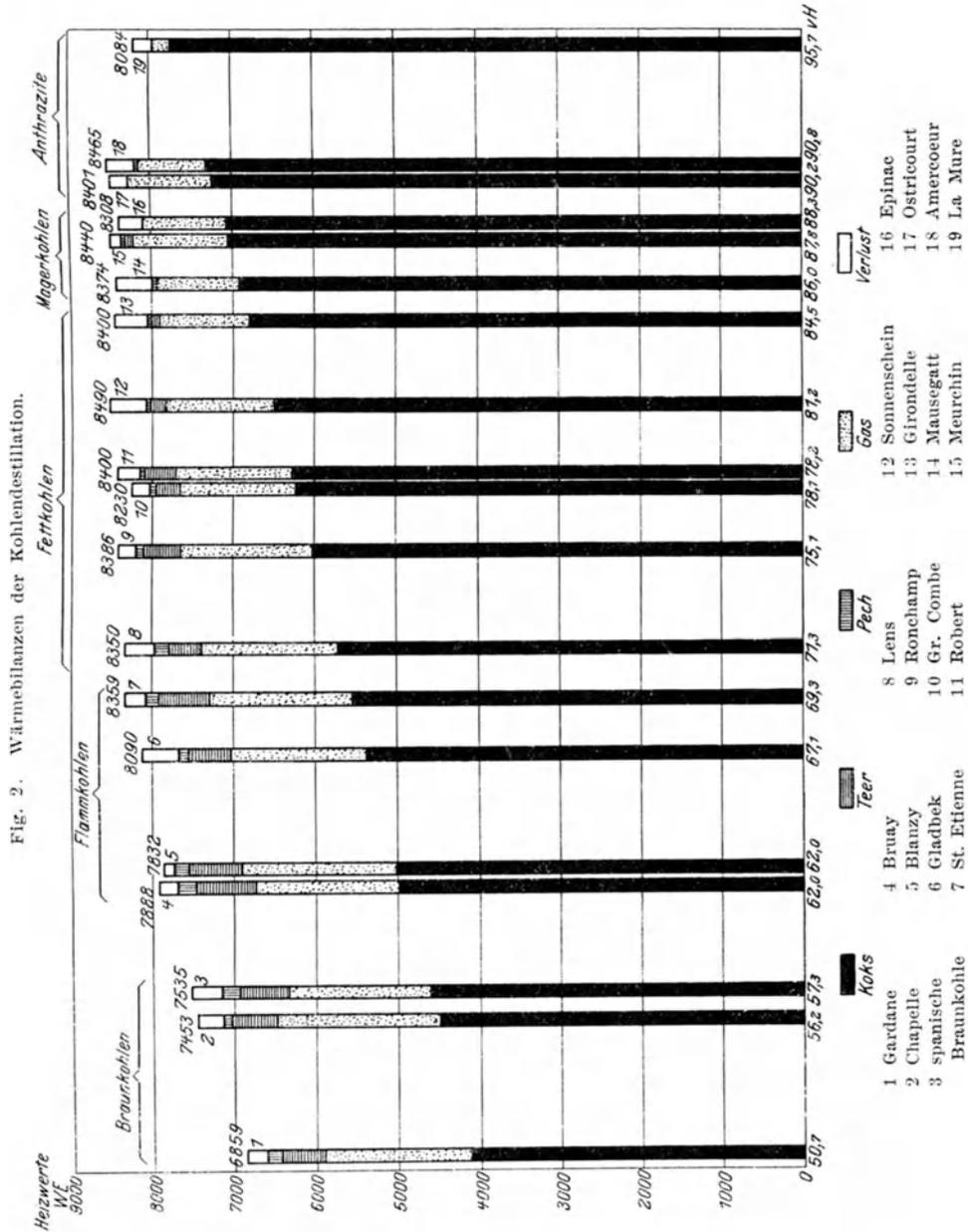


- | | | |
|--|---|---------------------------------|
| 1 französischer Anthrazit de la Mure | 10 halbfette Eßkohle der Zeche Rosenblumendelle | 28 Saarkohle Klein-Rosseln |
| 2 englischer Anthrazit | 11 halbfette Kohle Sonnenschein | 29 englische Flammkohle |
| 3 belgischer Anthrazit Amercoeur | 12 Fettkohle Grand' Combe | 30 Saarkohle Maybach |
| 4 französischer Anthrazit | 13 Fettkohle der Zeche Mansfeld | 31 Flammkohle Mines de Bruay |
| 5 Ruhr-Anthrazit | 14 Cardiffkohle | 32 Saarflammkohle Püttlingen |
| 6 Anthrazit Wiesche | 15 Fettkohle der Zeche Prosper | 33 Saarflammkohle von der Heydt |
| 7 Magerkohle aus Flöz Mausegatt | 16 bis 18 Ruhrfettkohlen | 34 Saarkohle Friedrichsthal |
| 8 halbfette Eßkohle der Zeche Rosenblumendelle | 19 Fettkohle Ronchamp | 35 spanische Kohle |
| 9 belgische Eßkohle | 20 bis 22 Ruhrfettkohlen | 36 Saarflammkohle |
| | 23 Ruhrflammkohle | 37 Saarkohle La Houve |
| | 24 Ruhrgasflammkohle | |
| | 25 bis 27 Saarkohlen Dudweiler | |

¹⁾ Streit, Dissertation, Zürich 1907.

rechnung der gefundenen Versuchszahlen auf aschen- und wasserfreie Kohlen und ebensolche Entgasungserzeugnisse konnten wir die Wärmebilanzen der Destillation für die verschiedenen Steinkohlengattungen aufstellen. Das Ergebnis dieser Untersuchungen läßt sich kurz dahin zusammenfassen, daß die Verbrennungswärme gleicher Gewichte der aus den verschiedenen Kohlentypen erzeugten Koks dieselbe ist, während die Verbrennungswärme der Gewichtseinheit der flüchtigen Bestandteile (nicht zu verwechseln mit der des Gases allein) mit zunehmender Menge derselben abnimmt, Fig. 1.

Bei der zeichnerischen Darstellung der Wärmebilanzen der Kohlendestillation in Fig. 2 bedeuten die Abszissen die Koksausbeuten in Hundertteilen der aschen-



und wasserfreien Kohlen, die schwarz gezeichneten Anteile der Ordinaten die in Wärmeeinheiten ausgedrückten Heizwerte (Verbrennungswärme bei Verbrennung zu Kohlensäure und Wasserdampf) der festen Bestandteile der brennbaren Substanz aus 1 kg Reinkohle; die punktierten Teile der Ordinaten bezeichnen die Heizwerte der aus der Gewichteinheit Reinkohle entstandenen Gase, die wagerecht gestrichelten Teile die Wärmeanteile der Teere, die senkrecht gestrichelten diejenigen der Peche und die weißen Teile die Beträge der verbleibenden Verluste. Aus Fig. 2 geht zunächst hervor, daß mit Zunahme des Gehaltes der Reinkohle an fixen Bestandteilen der Heizwert der Kohlen bis zu einem höchsten Werte steigt, den Kohlen mit ungefähr 16 bis 23 vH flüchtigen Bestandteilen aufweisen. Der geradlinige Anstieg des Heizwertes der fixen Bestandteile der Reinkohle ist die Folge der oben erwähnten Konstanz der Verbrennungswärme und des Heizwertes der unter denselben Versuchsbedingungen aus den verschiedensten Kohlengattungen dargestellten Reinkoks.

Die bisher besprochenen Ergebnisse beruhen alle auf vollkommener Verbrennung der untersuchten Kohlen und Destillationserzeugnisse entweder in der kalorimetrischen Bombe — in verdichtetem Sauerstoff — oder im Junkersschen Gaskalorimeter — in überschüssiger Luft. Bei industriellen Feuerungen verbrennen dagegen die auf den Rost aufgegebenen Kohlen in der Weise, daß sie zunächst entgast werden und die entweichenden Gase für sich verbrennen, worauf erst die Verbrennung der Koks eintritt. So erklärt es sich, daß beim Verfeuern von sehr gasreichen Kohlen aus Mangel an zum Verbrennen der Gase notwendigem Luftsauerstoff erhebliche Schornsteinverluste durch unvollständige Verbrennung der flüchtigen Bestandteile entstehen, während andererseits bei Kohlen mit hohem Gehalt an fixen Bestandteilen und bei Koks ein großer Luftüberschuß notwendig ist, um die glühenden Koks bei der verhältnismäßig niedrigen Schichthöhe auf den Planrosten zu verbrennen, was Verluste durch die fühlbare Wärme der bei hoher Temperatur entweichenden überschüssigen Luft zur Folge hat. Für eine bestehende Feuerungsanlage wird demnach bei gleichen Anschaffungskosten derjenige Brennstoff der wirtschaftlichste sein, bei dessen Verbrennung am wenigsten unverbrannte Gase auftreten und der geringste Luftüberschuß erforderlich ist.

Wir haben uns deshalb die Aufgabe gestellt, zu untersuchen, in welchem Verhältnis die erwähnten Wärmeverluste zu dem Gehalte der verfeuerten Kohlen an flüchtigen Bestandteilen stehen. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, haben wir unsre Untersuchungen auf die in unsrer Gegend gebräuchlichsten Planrost-Innenfeuerungen beschränkt. Im Anschluß an Versuche, die der Schweizerische Verein von Dampfkesselbesitzern an einem auf der Schiffswerft der Dampfschiffahrtsgesellschaft des Vierwaldstättersees in Luzern befindlichen ortfesten schottischen Schiffskessel und an einem Zweiflammrohrkessel der Appretur von Altherr & Zürcher in Speicher ausgeführt hat, und im Zusammenhange mit eigenen Versuchen an einem Zweiflammrohrkessel von Gebrüder Sulzer in Winterthur haben wir zunächst festzustellen gesucht, in welcher Weise die Gesamtwärme der verschiedenen Kohlengattungen sich bei einer und derselben Anlage nutzbar machen läßt. Wir haben mit andern Worten an der gleichen Kesselanlage durch Verdampfungsversuche die Wärmebilanzen für die verschiedenen Steinkohlengattungen als Funktion ihrer flüchtigen Bestandteile aufgestellt. Da bekanntlich die Berechnung der Wärmeverluste solcher Wärmebilanzen durch die Art und Weise der chemischen Untersuchung der Rauchgase wie auch durch die rechnerische Behandlung der gefundenen Analysenergebnisse beeinflusst wird, haben wir unsre Rauchgase in verschiedener Weise aufgefangen und untersucht, worüber unten berichtet werden wird. Es dürfte auch zweckmäßig sein, an diesem Orte den Einfluß der gebräuchlichsten Berechnungsweisen auf die Wärmebilanz zu erwähnen.

Bei den Versuchen in Winterthur, wo es sich um die Feststellung des Wirkungsgrades einer neuen Unterschubfeuerung handelte, wurde die Menge des während der Versuche entstandenen Russes so genau wie möglich bestimmt und in unsere Berechnung mit einbezogen. Um in den örtlichen Verlauf der Verbrennung Einblick zu bekommen, haben wir bei unsern Luzerner Versuchen die Flammen- und die Feuergase mittels wassergekühlter Röhren verschiedenen Stellen der Feuerung entnommen und ihre Zusammensetzung mit der der gleichzeitig gebildeten Rauchgase verglichen. Wir beschränken uns darauf, die Ergebnisse dieser Beobachtungen unten kurz wiederzugeben.

Der Kürze halber müssen wir uns auch darauf beschränken, von der einschlägigen Literatur hier nur folgende Veröffentlichungen aus den letzten Jahren anzuführen: In der Zeitschrift des Bayerischen Revisionsvereines¹⁾ haben Eberle und Zschimmer gezeigt, daß die Verluste durch unvollständig verbrannte Gase bei langflammigen Kohlen sehr bedeutend werden können, auch wenn bei der Verbrennung ein großer Luftüberschuß vorhanden ist. Sie geben ferner an, wie diese Wärmeverluste durch den Brennstoffen angepaßte Feuerungsanlagen (Schräg-rost, Zufuhr von Sekundärluft) bedeutend verringert werden können. In den »Feuerungsuntersuchungen des Vereines für Feuerungsbetrieb und Rauchbekämpfung in Hamburg«²⁾ bespricht F. Haier die Ergebnisse von Versuchen, die mit verschiedenen Kohlenarten zu dem Zweck angestellt worden sind, den Einfluß eines verschiedenen großen Luftüberschusses auf den Wirkungsgrad und die Rauchentwicklung einer Feuerungsanlage bei Beschickung mit einer und derselben Kohle festzustellen. Durch zeichnerische Darstellung der auf seinen Versuchen beruhenden Wärmebilanzen, wobei jeweilig die Luftüberschüsse am Flammrohrende als Abszissen gewählt wurden, hat Haier für jede verfeuerte Kohle die Aenderung der Wärmeverteilung mit zunehmendem Luftüberschuß in deutlichster Weise veranschaulicht. Im Berichte des genannten Hamburger Vereines vom Jahre 1907 wird aus den Ergebnissen der Prüfung der Wasserumlaufvorrichtung, Bauart Altmeyer, der Schluß gezogen, daß sich das Restglied in der Wärmebilanz nicht nur aus Wärmeverlusten zusammensetzt, die auf Vorgängen in der Feuerung und auf der Strahlung des Kesselmauerwerkes beruhen, sondern auch von Vorgängen im Innern des Kessels beeinflusst wird. Nach dem Erscheinen unserer Abhandlung hat de Grahl³⁾ ein Verfahren veröffentlicht, wonach er den Wärmeverlust durch Leitung und Strahlung ziffernmäßig bestimmt. Ob die bei unsern Versuchen sich ergebende Veränderlichkeit des Strahlungsverlustes von Vorgängen im Innern des Kessels herrührt, trotzdem die durch den Ruß verursachten Wärmeverluste ermittelt worden sind, oder von unvermeidlichen Fehlern der Probenahme und der Beobachtungen, soll hier nicht weiter untersucht werden. Unsere Versuche unterscheiden sich von den oben angegebenen grundsätzlich dadurch, daß wir bei einer und derselben Feuerungsanlage mit verschiedenen Kohlengattungen bei mittlerer Belastung der Anlage möglichst die gleiche Dampfmenge erzeugten und untersuchten, in welcher Weise unter diesen Umständen die Wärmebilanz von der Menge der flüchtigen Bestandteile der verfeuerten Kohlen beeinflusst wurde.

Um Wiederholungen zu vermeiden, führen wir zunächst an, in welcher Weise wir — um möglichst genaue Wärmebilanzen aufstellen zu können — bei allen unsern Verdampfungsversuchen verfahren sind.

¹⁾ Jahrgang 1906 S. 116.

²⁾ erschienen bei Julius Springer, Berlin 1906.

³⁾ Z. für Dampfkessel- und Maschinenbetrieb 1909 Nr. 51, 1910 Nr. 4.

Die Dauer der Versuche betrug je 8 st, wobei das Gewicht der verbrannten Kohlen, der entstandenen Schlacken und Aschen, sowie die Menge des verdampften Wassers so genau wie möglich ermittelt wurden. Ganz besondere Sorgfalt wurde der Entnahme der Durchschnittsproben der verfeuerten Kohlen und der erhaltenen Herdrückstände gewidmet, die unverändert dem Laboratorium übergeben und dort chemisch und kalorimetrisch untersucht wurden. Der Dampfdruck wurde am Kesselmanometer abgelesen; zur Messung der Zugstärke diente ein gewöhnliches U-förmiges Wassermanometer. Die Temperaturen im Freien, im Kesselhaus und im Fuchs wurden viertelstündlich abgelesen. Zur Ueberwachung des Feuerungsganges wurden die Rauchgase alle Viertelstunden mit dem Orsatapparat auf ihren Gehalt an CO_2 und O_2 geprüft. Zur Aufstellung der Wärmebilanzen dienten dagegen Durchschnittsproben der während 8 st entwickelten Rauchgase, die in der Weise aufgefangen wurden, daß ein mit Wasser gefüllter Gasbehälter durch eine besondere metallene Rohrleitung mit derselben Stelle des Fuchses verbunden wurde, wo die Rohrleitung des Orsatapparates abzweigte¹⁾. Durch gleichmäßiges Auslaufenlassen des Wassers während der ganzen Versuchsdauer wurde erreicht, daß die Rauchgase mit gleichmäßiger Geschwindigkeit in den Gasbehälter strömten. Die genaue Analyse der Rauchgase wurde teils volumetrisch im Laboratorium, teils gravimetrisch (im Kesselhaus zu Winterthur) ausgeführt.

Die chemische Analyse und die kalorimetrische Heizwertbestimmung der verfeuerten Kohlen und der erhaltenen Herdrückstände wurden mit den lufttrocken gemachten Proben vorgenommen und die Ergebnisse dann auf den Feuchtigkeitsgehalt der eingelieferten Kohlen, bei Schlacken und Aschen auf den wasserfreien Zustand umgerechnet. Um die verwendeten Brennstoffe zu kennzeichnen, führen wir unten außerdem die chemische Zusammensetzung sowie die Verbrennungswärme und die Heizwerte ihrer brennbaren Bestandteile an.

Die einzelnen Bilanzposten stellten wir nach den untenstehenden Gleichungen auf, wobei wir folgende Bezeichnungen anwandten:

- A = Wirkungsgrad der Anlage
- v_f = Verlust durch fühlbare Wärme
- v_u = Verlust durch unvollständig verbrannte Gase
- v_h = Verlust durch Herdrückstände
- v_r = Verlust durch Ruß
- W = verdampfte Speisewassermenge in kg, umgerechnet auf Wasser von 0°C und Dampf von 100°C und 760 mm Quecksilbersäule
- V_g = Rauchgasvolumen in cbm
- L = Luftvolumen in cbm
- V_w = Wasserdampfgehalt der Rauchgase
- W_r = Wärmehalt der heißen Gase
- K = Gewicht der verbrannten Kohle in kg
- R = Gewicht der Herdrückstände in kg
- H_k = Heizwert der verfeuerten Kohle in WE/kg
- H_r = Heizwert der entstandenen Herdrückstände in WE/kg
- \ddot{U} = Luftüberschuß
- t = Temperatur der Luft vor dem Rost
- T = Temperatur der Rauchgase im Fuchs
- f = Feuchtigkeitsgehalt der Luft bei t° in g/cbm

¹⁾ Vergl. Seyffart, Kesselhaus- und Kalkofen-Kontrolle, 2. Aufl. 1904; Brand, Techn. Untersuchungen zur Betriebskontrolle, 2. Aufl. Berlin 1907.

Das in obiger Gleichung vorkommende Rauchgasvolumen¹⁾ V_g berechnen wir nach der Gleichung:

$$V_g = \frac{c'}{\left(k_1 + k_2 + \frac{k_3}{5,36}\right) 0,536} \dots \dots \dots (2a),$$

das Luftvolumen:

$$L = \frac{\left(n' - \frac{N}{100}\right) 100}{79} \dots \dots \dots (2b),$$

den Wasserdampfgehalt der Rauchgase:

$$V_w = \frac{22,4 \left(fL + \frac{A_l}{100} + \frac{H'9}{100} - \frac{h'18}{22}\right)}{18} \dots \dots \dots (2c);$$

b) Verlust durch unvollständig verbrannte Gase:

$$v_u = \frac{3046 k_2' + 2598 h' + 8573 \text{ CH}_4'}{H_k} \dots \dots \dots (3);$$

c) Verlust durch Herdrückstände:

$$v_h = \frac{R H_R}{R H_k} \dots \dots \dots (4).$$

In denjenigen Fällen, wo der Heizwert der Herdrückstände nicht auf kalorimetrischem Wege ermittelt wurde, berechneten wir den Wärmeverlust aus dem Gewichte der Herdrückstände und ihrem Gehalt an brennbarer Substanz, V , nach der Formel:

$$v_h = \frac{V R 8,1}{100 k H_k} \dots \dots \dots (4a);$$

d) Verlust durch Ruß:

$$v_r = \frac{V_r k_3 8100}{H_k} \dots \dots \dots (5).$$

3) Bestimmung des Luftüberschusses²⁾

$$\ddot{U} = \frac{1,293 L}{11,494 c' + 34,43 H' - 4,31 (O' - S')} \dots \dots \dots (6).$$

Zur Erläuterung lassen wir die vollständige Berechnung eines Verdampfungsversuches von Ruhrbriketts (Rosenblumendelle) mit Handfeuerung folgen.

I. Beobachtungen.

Dauer des Versuches . . .	8 st
Wasser verdampft . . .	10765 kg = 11035 kg umgerechnet
Wassertemperatur . . .	10,3 °C
Dampfdruck	10,79 at = 11,79 at abs.
Kohle verbrannt	1343 kg
Herdrückstände:	
a) Schlacken	94,3 »
b) Asche	39,0 »
Temperaturen:	
Mittel der Kesselhaustemperatur	30,1 °C
» » Rauchgastemperatur (Kesselende)	333,8 »
Feuchtigkeitsgehalt der Luft	34 vH relative Feuchtigkeit.

¹⁾ Ueber Menge und Gewicht von Verbrennungsgasen s. Dosch, Zeitschr. f. Dampfkessel- und Maschinenbetrieb 1910 S. 1 bis 5 und 12 bis 15.

²⁾ Andere Formeln zur Berechnung des Luftüberschusses s. u. a. in: Fuchs, Generator-, Kraftgas- und Dampfkesselbetrieb, Berlin 1905, Julius Springer. — Derselbe, Formeln und Tabellen der Wärmetechnik, Berlin 1907. — Brand, Technische Untersuchungsmethoden zur Betriebskontrolle, Berlin 1907. — Hafer, Feuerungsuntersuchungen des Vereines für Feuerungsbetrieb und Rauchbekämpfung in Hamburg, Berlin 1906. Dosch, l. c.

II. Analysenergebnisse.

	Brennstoff							Heizwert WE
	C vH	H vH	O vH	N vH	S vH	Asche vH	Wasser vH	
Kohle	82,00	3,82	2,64	1,33	1,00	8,02	1,19	7606
Schlacke	31,10	0,28	1,73		0,23	66,66	—	2546
Asche	33,14	0,60	1,18		0,36	64,72	—	2741

Rauchgas.

Gehalt an CO₂ = 11,42 vH = k_1
 » » CO = 0,55 » = k_2
 » » H = 0,24 » = h
 » » O = 8,47 » = o
 » » N = 79,32 » = n .

Rußgehalt auf 1 cbm Rauchgas: 1,631 g Kohlenstoff = k_3 .

III) Berechnungen.

1) Der Nutzeffekt des Kessels berechnet sich nach Formel (1) zu:

$$A = \frac{11035 \cdot 637}{1343 \cdot 7606} = 0,688$$

2) Berechnung des Verlustes durch die fühlbare Wärme (Abwärme) der Gase.

Aus den Analysen der Kohle, Schlacke und Asche berechnet sich der wirklich verbrannte Kohlenstoff C' und Wasserstoff H' der Kohle folgendermaßen:

Kohle: C 82,00 vH von 1343 = 1101,3 kg
 H 3,82 » » 1343 = 51,3 »
 Schlacke: C 31,1 » » 94,3 = 29,3 »
 H 0,28 » » 94,3 = 0,26 »
 Asche: C 33,14 » » 39 = 12,92 »
 H 0,60 » » 39 = 0,23 »

Es kamen zur Verbrennung:

$$\left. \begin{aligned} C' &= 1101,3 - 42,2 = 1059,1 \text{ kg} = 78,86 \text{ vH} \\ H' &= 51,3 - 0,49 = 50,81 \text{ »} = 3,78 \text{ »} \end{aligned} \right\} \text{ des Kohlegewichtes.}$$

Aus der Zusammensetzung der Rauchgase ergibt sich das Rauchgasvolumen V_g auf 1 kg Kohle nach Formel (2a) zu

$$V_g = \frac{78,86}{\left(11,42 + 0,55 + \frac{1,631}{5,36}\right) 0,536} = 11,987 \text{ cbm.}$$

Diese 11,987 cbm Rauchgas bestehen nach der Analyse aus

$k_1' = 1,369 \text{ cbm} = \text{CO}_2$
 $k_2' = 0,066 \text{ »} = \text{CO}$
 $h_a' = 0,029 \text{ »} = \text{H}$
 $o' = 1,015 \text{ »} = \text{O}$
 $n' = 9,509 \text{ »} = \text{N.}$

Aus Formel (2b) ergibt sich das Luftvolumen für 1 kg Kohle zu

$$L = \frac{\left(9,509 - \frac{1,33}{100}\right) 100}{79} = 12,02 \text{ cbm.}$$

Da der Feuchtigkeitsgehalt der mit Wasserdampf gesättigten Luft bei 30,1° C 30,197 g/cbm beträgt, so ist der Wassergehalt von 1 cbm Luft mit 34 vH relativer Feuchtigkeit = 34 · 30,197 g, und der Gesamtwasserdampfgehalt des Rauchgases in cbm ist demnach nach Formel (2c):

$$V_w = \frac{22,4 \left(34 \cdot 30,197 \cdot 12,02 + \frac{1,19}{100} + \frac{3,78 \cdot 9}{100} \frac{0,029 \cdot 18}{22} \right)}{18} = 0,5644 \text{ cbm}^1).$$

Aus diesen Zahlen erhalten wir als Verlust durch fühlbare Wärme nach Formel (2):

$$V_f = \frac{[0,4402 \cdot 1,369 + 0,3143 \cdot 10,617 + 0,4078 \cdot 0,5644](303,7)}{7606} = 0,166.$$

3) Der Verlust durch unverbrannte Gase ergibt sich demnach aus Formel (3) zu

$$\frac{0,066 \cdot 3046 + 0,029 \cdot 2598}{7606} = 0,036.$$

4) Der Verlust durch Herdrückstände beträgt, nach Formel (4) berechnet:

$$\text{a) Schlacke } v_h = \frac{94,3 \cdot 2546}{1343 \cdot 7606} = 0,024,$$

$$\text{b) Asche } v_h = \frac{39 \cdot 2741}{1343 \cdot 7606} = 0,011.$$

5) Der Verlust durch Ruß ergibt sich nach Formel (5) zu:

$$v_r = \frac{11,987 \cdot 1,631 \cdot 8,1}{7606} = 0,021.$$

Wärmebilanz des Verdampfungsversuches:

Wirkungsgrad des Kessels	68,8 vH
Verlust durch fühlbare Wärme	16,6 »
» » unverbrannte Gase	3,6 »
» » Herdrückstände a) Schlacke	2,4 »
» » b) Asche	1,1 »
» » Ruß	2,1 »
» » Leitung und Strahlung	5,4 »
	100,0 vH.

II. Verdampfversuche.

1) Verdampfversuche am Werftkessel der Dampfschiffahrtsgesellschaft des Vierwaldstättersees in Luzern.

Die bereits eingangs erwähnten Versuche des Schweizerischen Vereines von Dampfkesselbesitzern²⁾, an die wir unsre Untersuchungen anschlossen, sollten feststellen, mit welcher Kohlengattung sich bei sachkundiger Feuerbedienung und gleicher

¹⁾ Mit vollständig genügender Annäherung ließe sich das Volumen des Wasserdampfes, der im Rauchgas aus 1 kg Kohle enthalten ist, auch berechnen nach der Gleichung:

$$V_w = \frac{22,4 (9H + W)}{18 \cdot 100}.$$

²⁾ 37. Jahresbericht 1905.

Dampferzeugung der beste Wirkungsgrad erzielen lasse. Hauptbedingung bei diesen Versuchen war die stündliche Erzeugung von gleichviel Dampf von gleichbleibendem Ueberdruck aus Wasser von gleicher Temperatur, wobei mit jeder Kohlensorte zwei Versuche ausgeführt wurden: der eine mit einer Dampferzeugung von 17 kg/st, der andre mit einer solchen von 23 kg/st auf 1 qm Heizfläche.

Der Versuchskessel war ein schottischer Schiffskessel, Fig. 3 bis 5, mit einem Flammrohr; der benutzte Rost ein Gollischer mit rechteckigen Rostköpfen; der höchste

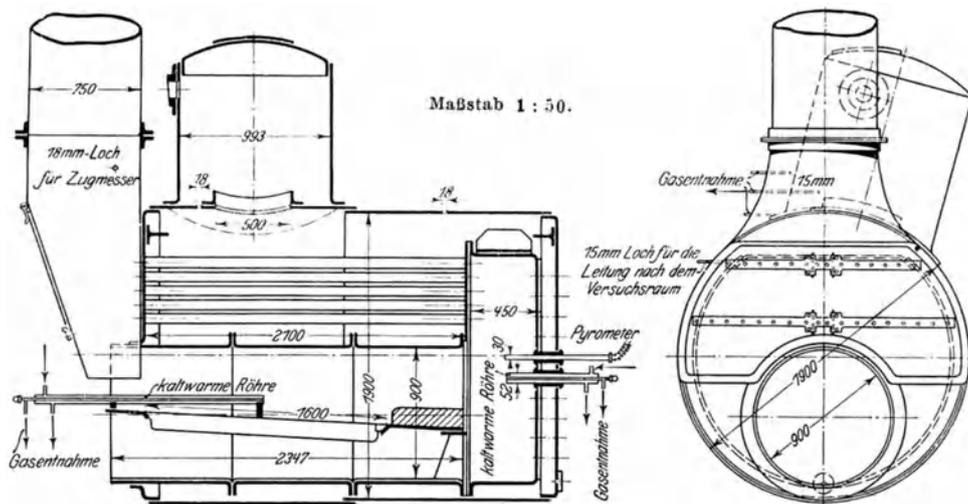
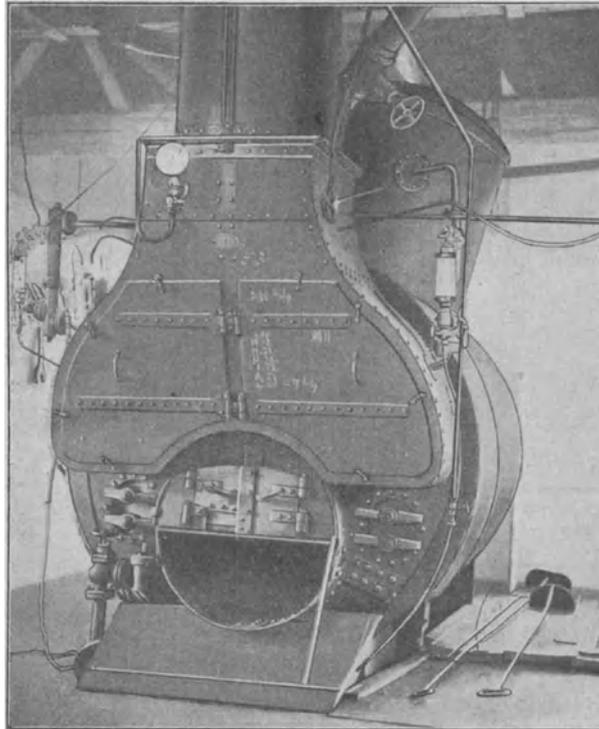


Fig. 3 bis 5. Schottischer Schiffskessel.

Ueberdruck betrug 5 at, die Heizfläche 60 qm, die Rostfläche 1,31 qm, die freie Rostfläche 0,60 qm = 46 vH der Gesamtrostfläche und das Verhältnis $\frac{\text{Rostfläche}}{\text{Heizfläche}} = \frac{1}{45,8}$.

Vor jedem Anheizen wurde der Kessel gerußt, eine halbe Stunde vor Beginn der Versuche der Rost abgeschlackt und der Aschenfall entleert und dasselbe je eine halbe Stunde vor Schluß der Versuche wiederholt. Das Heizen besorgte ein geübter Heizer, wobei die Zugstärke mit dem Schieber so geregelt wurde, daß nur der für eine möglichst vollkommene Verbrennung nötige Zug vorhanden war, was natürlich für die verschiedenen Kohlsorten jeweilig verschiedenen Luftüberschuß bedingte, der zwischen 0,40 und 1,10 schwankte. Die Versuchsdauer betrug, wie stets, 8 st. Die Menge des verdampften Speisewassers wurde durch Wägen und Messen ermittelt, die Temperatur wurde gleichzeitig mit den Orsatbestimmungen alle Viertelstunden in der Umkehrkammer und im Fuchs gemessen. Bei diesen Versuchen wurden die Rauchgasproben für die zur Berechnung der Wärmebilanz nötigen Analysen in einem 60 ltr fassenden Gasbehälter aufgefangen, sodann von dem Inhalt desselben eine Anzahl etwa 200 ccm fassender Gasproberöhren gefüllt, dicht verschlossen und ohne Verzug im Laboratorium analysiert¹⁾. Sämtliche Gasanalysen wurden im Hempelschen Apparat über Quecksilber vorgenommen, CO₂ und O durch Absorption, CO, H und CH₄ durch Verbrennung mittels der Drehschmidtschen Platinkapillare bestimmt.

Da als Sperrflüssigkeit im Gasbehälter Wasser verwendet worden war, in welchem sich ein Teil der Kohlensäure aus den Rauchgasen gelöst hatte, ermittelten

¹⁾ Gasproben, die nicht in zugeschmolzenen Glasgefäßen aufbewahrt werden, müssen unmittelbar nach ihrer Entnahme analysiert werden, weil sonst der Kohlensäuregehalt zu niedrig gefunden wird.

Zahlentafel 1.

Brennstoff	Chemische Zusammensetzung und kalorimetrische Heizwerte									
	der verfeuerten Brennstoffe						der entstandenen Herdrückstände			
	Gaskoks Luzern	Ruhrpreßkohlen, Marke V.G. der Zeche Maria bei Hönge	Oberrheinische Preßkohlen, Marke H. St.	Saarfettkohlen Maybach	Saarfettkohlen Friedrichstäl	Saarflammkohlen La Houve	Oberrheinische Preßkohlen, Marke H. St.	Saarfettkohlen Friedrichstäl	Saarflammkohlen La Houve	
Kohlenstoff vH	83,06	83,00	78,17	77,90	69,58	68,60	—	27,34	21,98	
Wasserstoff »	0,61	3,84	3,59	4,89	4,43	4,70	—	0,22	0,25	
Sauerstoff + Stickstoff . . . »	1,14	4,03	4,07	6,96	9,46	12,69	—	—	0,23	
Schwefel »	0,86	0,85	1,00	0,95	0,81	1,15	—	0,24	0,23	
Asche »	9,05	6,21	9,24	7,57	11,84	7,44	69,02	72,20	77,31	
Wasser »	5,28	2,07	3,93	1,73	3,88	5,42	—	—	—	
brennbare Bestandteile . . .	85,67	91,72	86,83	90,70	84,28	87,14	30,98	27,80	22,69	
Heizwert WE	6774	7667	7220	7476	6624	6525	2363	2103	1823	
	Vergleichswerte der brennbaren Bestandteile									
Kohlenstoff vH	96,96	90,49	90,03	85,89	82,56	78,73	—	98,24	96,91	
Wasserstoff »	0,72	4,19	4,13	5,39	5,26	5,40	—	0,79	1,11	
Sauerstoff + Stickstoff . . . »	1,33	4,39	4,69	7,68	11,22	14,55	—	—	0,98	
Schwefel »	0,99	0,93	1,15	1,04	0,96	1,32	—	0,97	1,00	
Verbrennungswärme . . . WE	8018	8540	8565	8514	8199	7817	7627	7623	8037	
Heizwert »	7979	8313	8342	8223	7915	7525	7627	7580	7977	
flüchtige Bestandteile in vH der brennbaren Substanz vH	2,0	16,5	19,1	36,7	38,0	45,1	0,9	4,2	8,7	
Aussehen des Verkokungsrückstandes	Pulver	gefrittet	backen	ge-gebläht	flossen	ge-flossen	sintert	Pulver	Pulver	Pulver

wir den Betrag dieser gelösten Kohlensäure in der Weise, daß wir in demselben Gasometer künstlich bereitete Rauchgase von entsprechendem Kohlensäuregehalt bei derselben Temperatur über Wasser stehen ließen und während 8 st stündlich die Menge der vom Wasser aufgenommenen Kohlensäure bestimmten. Zur Berechnung der Wärmebilanz bedienten wir uns jeweils der auf diese Weise berichtigten Werte.

Hinsichtlich der Versuche mit verstärktem Zuge beschränken wir uns auf die Wiedergabe der gefundenen Wirkungsgrade.

Als Brennstoffe für unsere Versuche verwendeten wir:

- 1) Grobkoks vom Gaswerk Luzern;
- 2) Preßkohlen, Marke V. G., der Zeche Maria bei Höngen (Wurmrevier);

Zahlentafel 2.

	Gaskoks Luzern	Ruhrpreß- kohlen, Marke V. G., Zeche Maria bei Höngen	Ober- rheinische Preßkohlen, Marke H. St.	Saar- fettkohlen Maybach	Saarfett- flammkohlen Friedrichs- thal	Saar- flammkohlen La Houve						
Brennstoff: verheizt im ganzen kg	1088	936	992	1083	1220	1300						
in 1 st »	136	117	124	135,4	152,5	162,5						
» » » auf 1 qm Heizfläche »	2,27	1,95	2,07	2,26	2,54	2,71						
» » » » 1 » Rostfläche »	103,5	89,3	94,6	103,4	116,4	124,0						
Rückstände: im ganzen »	111	68	103	98	147	111						
in Hundertteilen des ver- heizten Brennstoffes . . vH	10,2	7,3	9,6	9,0	12,0	8,5						
Verbrenliches in denselben »	34,4	40,1	31,0	29,0	27,8	22,7						
Speisewasser: verdampft im ganzen kg	8077	8306	8127	8385	8140	8176						
bezogen auf Wasser von 0° C und Dampf von 100° C . »	8211	8456	8290	8530	8278	8317						
in 1 st »	1026,4	1057	1036,3	1066,3	1034,7	1039,6						
» » » auf 1 qm Heizfläche »	17,1	17,6	17,3	17,8	17,2	17,3						
» » » » 1 » Rostfläche »	784	807	791	814	790	794						
Temperatur °C	7,0	6,5	5,2	7,0	7,0	7,0						
Dampf: Ueberdruck . . kg/qem	5,04	5,24	5,17	5,18	5,10	5,18						
Heizgase am Kesselende:												
Gehalt an CO ₂ vH	9,63	10,57	10,30	10,42	10,40	10,42						
CO »	0,17	0,21	0,61	1,70	0,65	2,22						
H »	—	—	—	0,70	0,18	0,60						
CH ₄ »	0,04	0,11	0,03	—	0,11	0,10						
O »	11,05	8,72	9,06	7,56	8,55	7,47						
N »	79,11	80,39	80,00	79,79	80,11	79,19						
Temperatur °C	302	303	276	297	280	306						
Verbrennungsluft: Temperatur »	9,4	7,4	8,1	4,2	7,5	4,8						
Luftüberschußkoeffizient . .	2,09	1,74	1,72	1,52	1,66	1,44						
Zugstärke mm W.-S.	4,5 bis 6	3	3,5 bis 4	4 bis 4,5	5 bis 6	3 bis 5						
Verdampfung: 1 kg Brenn- stoff verdampft Wasser . . kg	7,42	8,87	8,19	7,74	6,67	6,29						
desgl., berechnet auf Dampf von 100° C aus Wasser von 0° C (637 WE) . . »	7,55	9,03	8,36	7,88	6,79	6,40						
Wärmebilanz:	WE	vH	WE	vH	WE	vH	WE	vH	WE	vH	WE	vH
nutzbar gemacht: im Kessel	4807,4	71,0	5754,6	75,1	5323,3	73,7	5017,2	67,4	4322,3	65,3	4075,4	62,5
verloren: an freier mit den Gasen nach den Schorn- stein abziehender Wärme	1465,2	21,6	1383,5	18,1	1169,5	16,2	1184,2	15,9	1044,0	15,8	1027,7	15,7
durch unverbrannte Gase . .	97,5	1,4	216,9	2,8	271,9	3,8	822,6	11,0	374,4	5,7	898,7	13,8
in den Rückständen	280,8	4,1	232,2	3,0	244,2	3,4	212,7	2,9	253,4	3,8	155,6	2,4
durch Ruß, Leitung u. Strahlung	123,1	1,9	79,8	1,0	211,1	2,9	209,3	2,8	629,5	9,4	367,6	5,6
Summe = Heizwert des Brenn- stoffes »	6774	100,0	7667	100,0	7220	100,0	7446	100,0	6624	100,0	6525	100,0

- 3) Oberrheinische Preßkohlen, Marke H. St.;
- 4) Saarfettkohlen aus der Grube Maybach;
- 5) Saarfettflammkohlen aus der Grube Friedrichsthal;
- 6) Saarfammkohlen aus der Grube La Houve.

Die chemische Zusammensetzung und die auf kalorimetrischem Wege ermittelten Heizwerte der Brennstoffe mit dem Feuchtigkeitsgehalt, den sie im Kesselhaus aufwiesen, sowie die hieraus berechneten Vergleichswerte, die sich auf die brennbaren Bestandteile beziehen, sind in Zahlentafel 1 zusammengestellt und nach steigendem Gehalt der Brennstoffe an flüchtigen Bestandteilen (ausgedrückt in Hundertteilen der brennbaren Bestandteile) geordnet. In Zahlentafel 1 sind ferner die Herdrückstände von 3 Versuchen mit Preßkohlen H. St. und den Saarkohlen Friedrichsthal und La Houve aufgeführt.

Zahlentafel 2 enthält, ebenfalls nach dem Gehalte der Kohlen an flüchtigen Bestandteilen geordnet, unsere Beobachtungen bei den Verdampfungsversuchen,

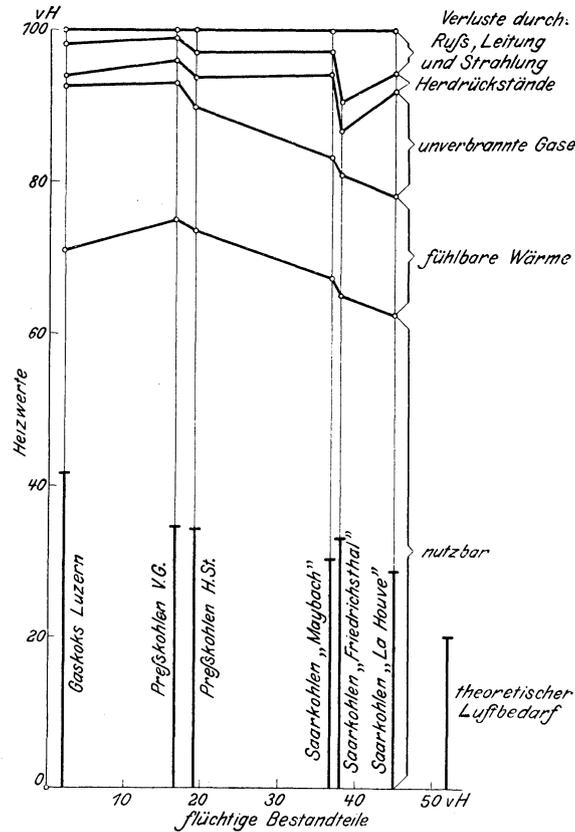


Fig. 6. Wärmebilanzen der Verdampfversuche in Luzern.

sowie die Analysen der Rauchgase und die daraus nach den oben angegebenen Gleichungen berechneten Wärmebilanzen der verschiedenen Versuche, ausgedrückt in WE und in Hundertteilen der Gesamtwärme.

Außer den in Zahlentafel 2 angeführten Beobachtungen bestimmten wir noch regelmäßig die Temperatur der Isolierhülle, die bei allen unsern Versuchen fast gleichbleibend 60° C war, und die Temperaturen in der Umkehrkammer; letztere waren in demselben Maße von der Natur der Brennstoffe und dem dadurch bedingten Luftüberschuß abhängig, wie die Fuchstemperaturen.

Der größeren Uebersichtlichkeit halber bedienen wir uns für die Zusammenstellung der aus unsern Versuchen berechneten Wärmebilanzen der zeichnerischen Darstellung, wobei in den Schaulinien, Fig. 6, die Abszissen den Gehalt der Brennstoffe an flüchtigen Bestandteilen (bezogen auf Reinkohle) bedeuten, während die Ordinaten, in vH ausgedrückt, die Anteile der Heizwerte der verfeuerten Brennstoffe darstellen, die auf die einzelnen Bilanzposten entfallen. Die bei den einzelnen Versuchen verwendeten Luftüberschüsse sind gleichfalls als Ordinaten aufgetragen, wobei als Einheit der beigezeichnete theoretische Luftbedarf dient.

Bei den verstärkten Verdampfungsversuchen mit einer Belastung von 23,3 bis 23,6 kg Dampf in der Stunde auf 1 qm Heizfläche wurden mit denselben Versuchskohlen folgende Wirkungsgrade gefunden:

Zahlentafel 3.

Brennstoffe	Gaskoks	Preßkohlen V. G.	Preßkohlen H. St.	Saarkohlen Maybach	Saarkohlen Friedrichs- thal	Saarkohlen La Houve
Belastung . . . kg	17,6	23,3	23,4	23,4	23,5	23,6
Wirkungsgrad . vH	70,4	71,9	70,4	63,9	59,6	57,0

Ein Vergleich der graphisch dargestellten Wirkungsgrade der Versuche mit normaler Belastung, s. die S. 27 folgende Figur 15, sowie der Wirkungsgrade bei den Versuchen mit verstärkter Belastung lehrt, daß bei beiden Versuchsreihen die Preßkohlen V. G. (Ordinaten Nr. 2 und 8) und H. St. (Ordinaten Nr. 3 und 9) mit 16,5 und 19,1 vH flüchtigen Bestandteilen die beste Wärmeausnutzung ergeben; sodann folgen der Gaskoks von Luzern und hierauf erst die Saarkohlen, die letzteren in der Reihenfolge ihres Gasgehaltes. Vergleicht man die Wirkungsgrade in Zahlentafel 2 und 3 mit den Heizwerten der entsprechenden Versuchskohlen in Zahlentafel 1, so beobachtet man zwischen beiden keinen Zusammenhang, wohl aber zeigen die Verbrennungswärmen und Heizwerte der brennbaren Bestandteile dieser Kohlen denselben Gang wie die Wirkungsgrade. Daß jedoch die Schaulinien der Wirkungsgrade mit denjenigen der Heizwerte der Reinkohle nicht parallel gehen, rührt von der Natur der verfeuerten Brennstoffe her.

Die Wärmeausnutzung bei den Verdampfversuchen mit Preßkohlen H. St. betrug 73,7 vH und verstärkt 70,4 vH, bei den Versuchen mit der Saarkohle Maybach, deren Heizwert der Reinkohle nur 1,5 vH niedriger war als derjenige der genannten Preßkohlen, sank der Wirkungsgrad um 6,4 bis 6,6 vH. Dieser starke Abfall der Wärmeausnutzung rührt vom hohen »Gas«gehalt der Saarkohle her. Um dessen Wärmeinhalt zu gewinnen, müßte man bei der Verbrennung Sekundärluft anwenden; da dies jedoch bei unsrer Versuchsanordnung nicht angängig war, entwich eine bedeutende Menge Wärme in Form von unvollständig verbrannten Gasen in den Schornstein, wie man aus Fig. 6 ersehen kann. Obige Erklärung gilt auch für den Unterschied im Wirkungsgrad der Koksfeuerung und der mit Saarkohlen Friedrichsthal, bei denen der Heizwert der brennbaren Substanz um weniger als 1 vH voneinander abwich, während der Unterschied der Wirkungsgrade 5,7 vH betrug. Umgekehrt ersieht man aus der Figur 15, S. 27, daß bei den Saarkohlen Friedrichsthal (Ordinaten Nr. 5 und 11) und Maybach (Ordinaten Nr. 4 und 10), zwei Kohlenarten, die fast den gleichen Gehalt an flüchtigen Bestandteilen besitzen, die Wärmeausnutzung dem Heizwert ihrer brennbaren Bestandteile parallel geht.

Die Tatsache, daß auch bei den Verdampfversuchen mit Gaskoks, bei denen der Verlust durch unvollständig verbrannte Gase nur etwa 1 vH betrug, der Wirkungs-

grad geringer war als bei der Verfeuerung von Steinkohlenbriketts, erklärt sich aus dem großen Luftüberschuß, den die Koks zu ihrer Verbrennung bedürfen; dadurch entstehen entsprechend große Schornsteinverluste durch fühlbare Wärme. Bei Koks ließ sich auch eine stärkere Rostbeanspruchung als die von uns gewählte nicht erreichen. Eine Betrachtung der Figur 6 zeigt ferner, daß mit zunehmendem Gehalt der Brennstoffe an flüchtigen Bestandteilen die Wärmeverluste durch unvollständig verbrannte Gase sowie durch Ruß, Wärmeleitung und Strahlung zunehmen, während die Wärmeverluste durch die Herdrückstände bei allen unsern Versuchen so ziemlich den gleichen Betrag erreichen. Letzteres rührt daher, daß unsre Versuchskohlen keine großen Schwankungen des Aschengehaltes aufwiesen und daß ferner die entstandenen Herdrückstände bei allen Versuchen ungefähr gleichviel Verbrennliches zurückhielten.

2) Verdampfversuche an einem Cornwallkessel mit zwei Feuerrohren im Kesselhaus von Altherr & Zürcher in Speicher.

Bei Leistungsversuchen, die der Schweizerische Verein von Dampfkesselbesitzern vornahm, um den Wirkungsgrad der neuen Kesselanlage und den Dampfpreis mit einer Saarflammkohle und einer oberbayerischen Molassekohle festzustellen, bot sich uns die Gelegenheit, an einer zweiten Kesselanlage mit Planrost-Innenfeuerung zu untersuchen, ob die von uns in Luzern beobachteten Beziehungen zwischen dem Heizwert der brennbaren Bestandteile der Brennstoffe und ihrer Ver-

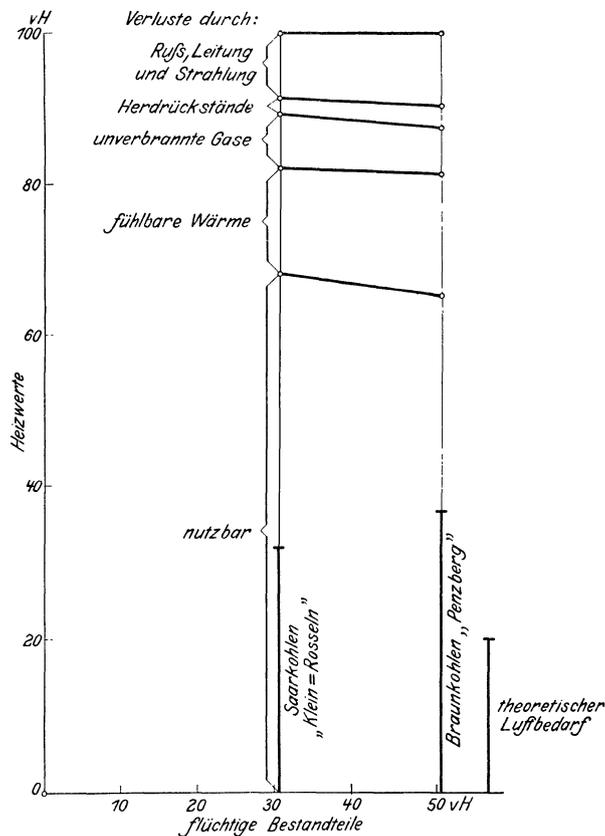


Fig. 7. Wärmebilanzen der Verdampfversuche in Speicher.

dampffähigkeit, sowie zwischen dem Gehalt der Kohlen an flüchtigen Bestandteilen und den Wärmeverlusten bei der Verbrennung auf dem Rost auch für die langflamigsten Kohlen Geltung hätten.

Der höchste Ueberdruck des Kessels betrug 8 at, die Heizfläche 72 qm, die Rostfläche 2,25 qm, und das Verhältnis $\frac{\text{Rostfläche}}{\text{Heizfläche}}$ war $= \frac{1}{32}$. Der Kessel war frisch gereinigt. Wie in der Einleitung bereits angegeben, dauerten die Versuche bei dieser Kesselanlage aus betriebstechnischen Gründen nur 6 Stunden, und der Kessel konnte nur in geringem Maße beansprucht werden. Hinsichtlich der Versuchsanordnungen, Beobachtungen und Analysen verweisen wir auf das eingangs Gesagte.

Zahlentafel 4 enthält die Brennstoffanalysen, Zahlentafel 5 die Beobachtungen, Gasanalysen und die daraus berechneten Wärmebilanzen. Als Sperrflüssigkeit im Sammelgasbehälter benutzten wir Wasser, das tags zuvor durch 12stündiges Hindurchleiten von Rauchgasen aus derselben Kohle gesättigt worden war. Fig. 7 gibt die Wärmebilanzen in Schaulinien wieder und zeigt, daß auch bei dieser Kesselanlage der Wirkungsgrad der Feuerung mit zunehmendem Gehalt der Brennstoffe an flüchtigen Bestandteilen abnimmt.

Statt 12,7 kg Dampf auf 1 qm Heizfläche und Stunde konnte bei der Penzberger Kohle, trotz Anwendung einer niedrigeren Brennstoffschicht und stärkeren Zuges als bei der Saarkohle Klein-Rosseln, nur eine Verdampfung von 10,7 kg erreicht werden, weil sich der Planrost für Braunkohlen nicht eignet¹⁾. Die Folge war, daß der Luftüberschuß vom 0,59fachen auf das 0,83fache anstieg. Hierdurch erklärt sich die in Fig. 7 ersichtliche Zunahme des Verlustes durch fühlbare Wärme und die Abnahme des Wärmeverlustes durch unvollständig verbrannte Gase bei der Braunkohle, trotzdem diese rd. 10 vH mehr flüchtige Bestandteile als die Saarfammkohle enthält.

Zahlentafel 4.

Chemische Zusammensetzung und kalorimetrische Heizwerte der verfeuerten Brennstoffe.

Brennstoff	Saarkohle Klein-Rosseln	Braunkohle Penzberg	Herdrückstände der Braunkohle Penzberg
Kohlenstoff vH	72,99	54,60	43,16
Wasserstoff »	4,94	4,26	1,38
Sauerstoff + Stickstoff »	9,57	12,25	1,31
Schwefel »	1,42	5,02	2,86
Asche »	8,20	12,00	51,29
Wasser »	2,88	11,87	—
brennbare Bestandteile »	88,92	76,13	48,71
Heizwert WE	6985	5127	3794
	Vergleichswerte der brennbaren Bestandteile		
Kohlenstoff vH	82,09	71,72	88,61
Wasserstoff »	5,56	5,59	2,83
Sauerstoff + Stickstoff »	10,75	16,09	2,69
Schwefel »	1,60	6,60	5,87
Verbrennungswärme WE	8175	7147	7945
Heizwert »	7875	6845	7792
flüchtige Bestandteile in vH der brennbaren Bestandteile vH	40,9	51,6	34,3
Aussehen des Verkokungsrückstandes	glänzend gebacken	Pulver	Pulver

¹⁾ Eberle und Zschimmer a. a. O.

Zahlentafel 5.
Beobachtungen, Gasanalysen und Wärmebilanz.

	Saarkohlen Klein-Rosseln		Bayrische Braunkohlen Penzberg	
	WE	vH	WE	vH
Brennstoff: verheizt im ganzen kg	735		860	
in 1 Stunde »	122,5		143,3	
» » » auf 1 qm Heizfläche »	1,70		1,99	
» » » » 1 » Rostfläche »	54,4		63,7	
Rückstände: im ganzen »	61		33	
in Hundertteilen des verheizten Brennstoffes . . vH	8,3		3,8	
Verbrenliches in denselben »	21,6		48,7	
Speisewasser: verdampft im ganzen kg	5913,6		4880,4	
bezogen auf Wasser von 0° C und Dampf von 100° C »	5502,6		4526	
in 1 Stunde »	917,1		754,3	
» » » auf 1 qm Heizfläche »	12,74		10,47	
» » » » 1 » Rostfläche »	407,6		335,3	
Temperatur °C	64,7		67	
Dampf: Ueberdruck at	6,54		6,50	
Heizgase am Kesselende: Gehalt an				
CO ₂ vH	10,38		9,00	
CO »	1,13		0,75	
H »	0,35		0,33	
O »	8,00		10,08	
N »	80,14		79,84	
Temperatur °C	273		262,5	
Verbrennungsluft: Temperatur »	33,9		32,8	
relativer Feuchtigkeitsgehalt vH	39		41	
Luftüberschußkoeffizient	1,59		1,83	
Zugstärke mm	3,4		5,2	
Verdampfung: 1 kg Brennstoff verdampfte Wasser kg	8,05		5,67	
desgl. berechnet auf Dampf von 100° C aus Wasser von 0° C »	7,49		5,26	
Wärmebilanz:				
nutzbar gemacht: im Kessel	4768,7	68,3	3347,8	65,3
verloren: an freier mit den Gasen nach den Schorn- stein abziehender Wärme (fühlbare Wärme) . .	969,6	13,9	823,5	16,1
durch unverbrannte Gase	499,9	7,1	318,3	6,2
in den Rückständen	145,1	2,1	145,6	2,8
durch Ruß, Leitung und Strahlung	601,7	8,6	591,8	9,6
Summe = Heizwert der Kohle	6985	100,0	5127	100,0

Der Verlust durch die Herdrückstände konnte bei dem Versuch mit der Braunkohle nicht genau festgestellt werden, weil mehr als die Hälfte des Aschengehaltes der Kohle als Flugstaub in die Züge mitgerissen wurde. Der Aschengehalt der Kohle betrug 12,0 vH, das Gewicht der Herdrückstände nur 3,8 vH mit 48 vH brennbaren Bestandteilen.

3) Verdampfversuche an einem Zweiflammrohrkessel im Kesselhaus 1 von Gebrüder Sulzer in Winterthur mit Planrostfeuerung und mit einer mechanischen Unterschubfeuerung.

Bei den bisher beschriebenen Verdampfversuchen waren einerseits kurzflamige Brennstoffe, wie Koks und Steinkohlenbriketts, verwendet worden, andererseits die langflamigsten Steinkohlen, wie Saarfett- und Flammkohlen, sowie eine Sorte Braunkohlen. Um festzustellen, ob auch für die dazwischenliegenden eigentlichen Fettkohlen und Fettflamkohlen (Kohlen mit 20 bis 35vH »Gas«) die Wärmeverluste auf dem Rost mit zunehmendem Gehalt der Reinkohlen an flüchtigen Bestandteilen

anwachsen, erbaten wir uns von Gebrüder Sulzer in Winterthur die Erlaubnis, in deren Kesselhaus Leistungsversuche mit sorgfältig ausgewählten Brennstoffen auszuführen. Dies wurde uns in entgegenkommendster Weise gestattet und uns daselbst gleichzeitig Gelegenheit geboten, unsre Versuche an demselben Dampfkessel einmal mit Planrostfeuerung und dann auch mit einer mechanischen Unterschubfeuerung durchzuführen.

Die Versuche in Luzern und in Speicher hatten ergeben, daß die Wärmeverluste durch Leitung, Strahlung und Rußbildung ebenfalls mit zunehmendem Gehalt der Brennstoffe an flüchtigen Bestandteilen zunahmen. Da insbesondere bei der Versuchsanlage in Luzern die Isolierung des Dampfkessels so vorzüglich war, daß wir annehmen durften, die Leitungs- und Strahlungsverluste bei den unter gleichen Verhältnissen der Außentemperaturen usw. ausgeführten Versuchen seien dieselben, drängte sich uns die Vermutung auf, daß das Anwachsen des genannten Bilanzpostens von einem Zusammenhang zwischen der Menge des gebildeten Rußes und der flüchtigen Bestandteile der verbrannten Kohlen herrühre. Dies veranlaßte uns, bei den Versuchen in Winterthur jeweilig die Menge des gebildeten Rußes zu ermitteln, um den entsprechenden Wärmeverlust berücksichtigen zu können.

Da bei den Versuchen in Luzern und in Speicher zwischen den Mittelwerten der mittels des Orsat-Apparates entnommenen Einzelproben und den Ergebnissen der genauen volumetrischen Gasanalysen der im Gasometer während der ganzen Dauer jedes Versuches aufgesammelten Durchschnittproben erhebliche Unterschiede gefunden worden waren, hielten wir es für geboten, bei unsern Versuchen in Winterthur festzustellen, welche von den üblichen Verfahren der Rauchgasanalyse Werte gäben, die den Ergebnissen des genauesten, des von Bunte ausgearbeiteten gravimetrischen, Verfahrens am nächsten kämen. Zu diesem Zweck untersuchten wir die Rauchgase in folgender Weise:

- 1) durch genaue Gewichtsanalyse nach Bunte an Ort und Stelle;
- 2) mittels viertelstündlich entnommener Orsat-Proben unter Benutzung des sehr zweckmäßigen Apparates von Hahn und Hankus;
- 3) mittels des aufzeichnenden Ados-Apparates;
- 4) durch Aufsammeln von Durchschnittsproben über rauchgasgesättigtem Wasser; diese Proben wurden im Laboratorium volumetrisch und durch Gewichtsanalyse untersucht;
- 5) durch Auffangen von Durchschnittsproben, die mittels des Orsat-Apparates und zum Teil auch vollständig untersucht wurden, über 50prozentigem Glycerin.

Um die erwähnten Verfahren einwandfrei zu prüfen, mußten die für die verschiedenen Proben erforderlichen Rauchgase an derselben Stelle gefaßt werden. Wir verfahren deshalb nach Bunte in der Weise, daß wir während der ganzen Dauer jedes Versuches einen großen Ueberschuß der Rauchgase mit Hilfe einer Wasserstrahlpumpe durch eine mit 10 at Ueberdruck auf ihre Dichtigkeit geprüfte gußeiserne Leitung aus der Uebergangsstelle der Gase aus dem dritten Zug im Rauchkanal, s. Fig. 8, ansaugten und die Apparate durch ganz kurze seitliche Verbindungen an diese Hauptleitung anschlossen. Die Einzelheiten der Anordnung finden sich im analytischen Teil dieser Abhandlung. Der Berechnung der Wärmebilanzen dieser Verdampfversuche legten wir die durch Gewichtsanalyse gefundenen Ergebnisse zugrunde¹⁾.

¹⁾ Die Vermutung von de Grahl, daß durch etwa vorhandenes Methan, das als Kohlenoxyd und Wasserstoff in Rechnung gesetzt wird, ein erheblicher Fehler in der Bilanz entstehen könne, ist unzutreffend (vergl. Hafer a. a. O.).

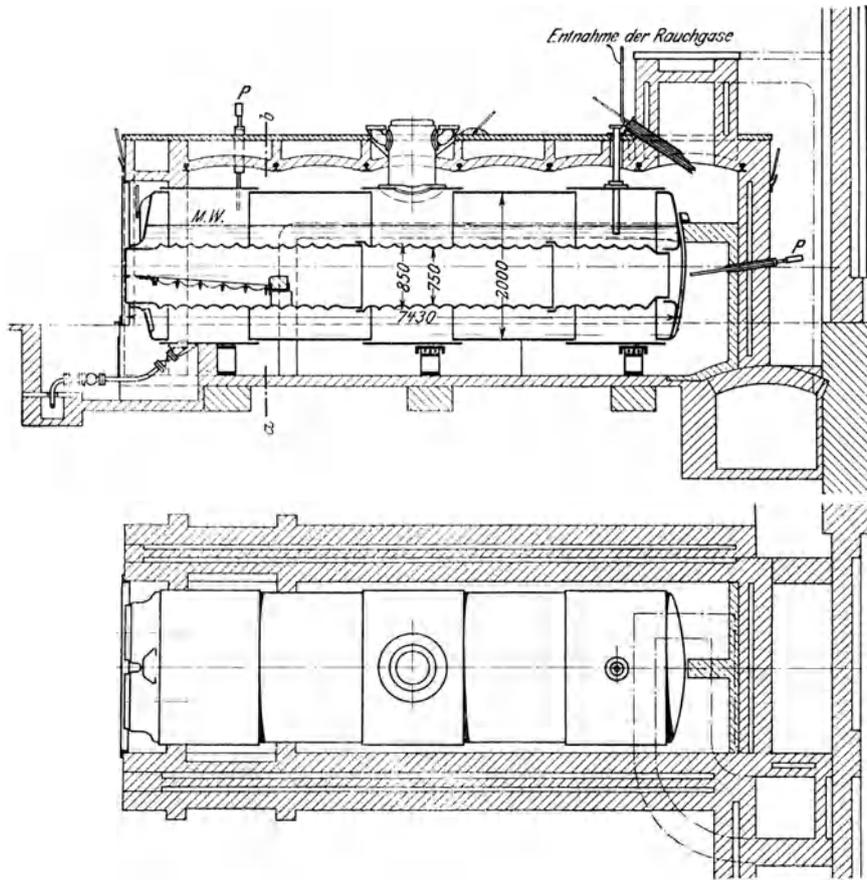


Fig. 8 bis 10. Zweiflammrohrkessel bei Gebrüder Sulzer in Winterthur. Maßstab 1:100.

Der Versuchskessel, Fig. 8 bis 10, war ein Zweiflammrohrkessel im Kesselhaus 1 von Gebrüder Sulzer in Winterthur. Links und rechts davon steht ein gleicher Kessel. Für die erste Versuchsreihe wurde ein Mehlscher Rost benutzt. Die Heizfläche des Kessels beträgt 65 qm, die Rostfläche 1,6 qm und das Verhält-

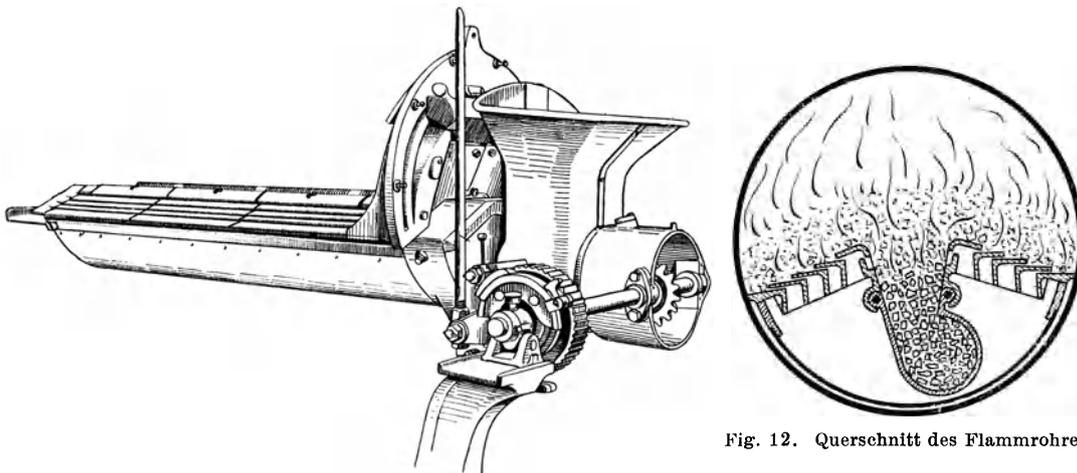
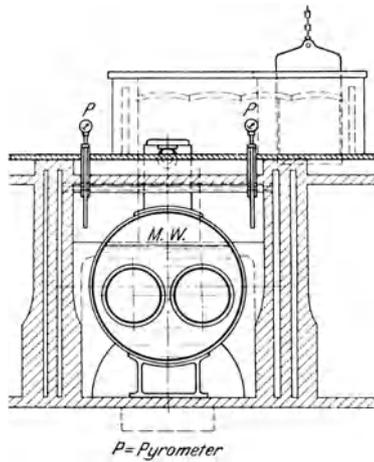


Fig. 11. Unterschubfeuerung, Bauart Nyeboe und Nissen.

Fig. 12. Querschnitt des Flammrohres.



nis $\frac{\text{Rostfläche}}{\text{Heizfläche}}$ ist = $\frac{1}{39,4}$. Der Kessel war frisch gereinigt und gerußt. Eine halbe Stunde vor Beginn jedes Versuches wurde der Rost abgeschlackt und der Aschenfall entleert. Das Abschlacken erfolgte dann noch dreimal, zuletzt eine halbe Stunde vor Beendigung des Versuches. Als Belastung wurden 21 bis 22 kg Dampf auf 1 qm Heizfläche und Stunde gewählt und die Zugstärke mit dem Schieber entsprechend geregelt. Die Asche und die Schlacke wurden getrennt aufgefangen und untersucht, s. Zahlentafel 8 und 9.

Für die zweite Versuchsreihe war eine Unterschubfeuerung, Bauart Nyeboe und Nissen, Fig. 11 und 12, in die Feuerrohre eingebaut worden. Bei dieser betrug die Rostfläche 1,9 qm

und demgemäß das Verhältnis $\frac{\text{Rostfläche}}{\text{Heizfläche}}$ $\frac{1}{34,2}$. Die für die Verbrennung notwendige Luft wurde durch ein Kreiselgebläse mit Ueberdruck durch den Rost eingepreßt.

Bei diesen Versuchen war es nur notwendig, je zweimal abzuschlacken. Der Aschenfall blieb infolge der Anwendung von Druckluft und der Konstruktion des Rostes leer. Da bei Flammrohrkesseln noch keine Erfahrungen mit dieser Unterschubfeuerung vorlagen, war es uns nicht möglich, diese Versuchsreihe mit derselben Belastung durchzuführen wie die erste, sondern wir gelangten zu Belastungen von 22 bis 27 kg. Diese Schwankungen rühren davon her, daß die Beschickvorrichtung für jede Kohlensorte besonders eingestellt werden muß und die Brennstoffzufuhr sich daher schwerer regeln läßt als bei der Handbeschickung.

Die Rauchgase des Versuchskessels gelangen aus dem Fuchs in einen Hauptkanal, der die Abgase von zwei Kesselbatterien aufnimmt. Deshalb mußten wir darauf verzichten, bei unsern Versuchen die Rauchentwicklung aus dem Schornstein zu berücksichtigen.

Bei allen Versuchen wurden die übrigen Kessel mit demselben Brennstoff geheizt wie der Versuchskessel und besonders dafür Sorge getragen, daß die Abgangtemperaturen der Rauchgase in allen drei Kesseln gleich waren. Unter diesen Umständen war anzunehmen, daß die Strahlungs- und Leitungsverluste in allen Fällen nahezu dieselben sein würden. Wie unsere Beobachtungen zeigen, waren tatsächlich die Temperaturen der freien Flächen des Kesselmauerwerkes bei jeder Versuchsreihe annähernd dieselben, s. Zahlentafel 6.

Zahlentafel 6.

	Handfeuerung				Unterschubfeuerung			
	Kesselhaus °C	Stirnwand °C	Kesseldecke °C	Rückwand °C	Kesselhaus °C	Stirnwand °C	Kesseldecke °C	Rückwand °C
Preßkohlen Rosenblumendelle . . .	30	69	68	68	27	72	54	55
Ruhrkohlen Deutscher Kaiser . . .	29	69	59	61	24	67	54	60
» Dahlbusch . . .	23	63	69	69	31	80	58	66
Saarkohlen Püttlingen . . .	26	62	68	68	30	67	55	59

Die Menge des verdampften Speisewassers wurde mittels eines geeichten Gefäßes gemessen. Mit Graphitpyrometern wurden im ersten Zug, mit elektrischen Pyrometern im zweiten Zug und im Fuchs die Temperaturen der Zahlentafel 7 beobachtet.

Zahlentafel 7

Brennstoff	Handbeschickung			Unterschubfeuerung		
	1. Zug °C	2. Zug °C	Fuchs °C	1. Zug °C	2. Zug °C	Fuchs °C
Preßkohlen Rosenblumendelle . .	609	355	334	605	356	341
Ruhrkohlen Deutscher Kaiser . .	607	345	330	588	343	328
» Dahlbusch	591	358	338	650	368	355
Saarkohlen Püttlingen	564	341	326	635	366	347

Aus diesen Zahlen ist ersichtlich, daß der Unterschied zwischen den Temperaturen des ersten und zweiten Zuges bei allen Versuchen annähernd derselbe war trotz verschiedener Luftüberschüsse und Verfeuerung verschiedener Kohlsorten. Zur weiteren Wärmeausnutzung ziehen die Rauchgase noch durch einen Speisewasservorwärmer.

Die für beide Versuchsreihen verwendeten Brennstoffe waren:

- 1) Ruhrpreßkohlen der Zeche Rosenblumendelle, Marke R,
- 2) Ruhrfettkohlen der Zeche Deutscher Kaiser,
- 3) Ruhrflammkohlen der Zeche Dahlbusch,
- 4) Saarflammkohlen aus der Grube Püttlingen,

deren chemische Zusammensetzung, Heizwerte und Vergleichswerte neben denen der entsprechenden Herdrückstände wir in Zahlentafel 8 zusammenstellen. Wir möchten nicht unterlassen, hier zu erwähnen, daß die Versuche der zweiten Reihe zwei Monate später ausgeführt worden sind als die mit Handbeschickung und daß die Brennstoffe für die beiden Versuchsreihen verschiedenen Sendungen entstammten, woraus sich die in der Zahlentafel ersichtlichen Unterschiede in der Zusammensetzung der bei Parallelversuchen verwendeten Kohlen erklären. Zahlentafel 9 enthält die Parallelversuche, gleichfalls nach dem Gehalte der Kohlen an flüchtigen Bestandteilen geordnet, unsere Beobachtungen, die gravimetrisch ausgeführten Rauchgasanalysen und die daraus berechneten Wärmebilanzen.

In den Figuren 13 und 14, in denen Abszissen und Ordinaten dieselbe Bedeutung haben wie in den Figuren 6 und 7, haben wir der Uebersicht wegen die Wärmebilanzen der Verdampfungsversuche mit Handfeuerung sowie derer mit Unterschubfeuerung zusammengestellt.

Bei den Versuchen mit Handbeschickung, Fig. 13, ist auch hier die Abnahme des Wirkungsgrades mit Zunahme des Gehaltes an flüchtigen Bestandteilen der Kohlen erkennbar, und zwar gibt der magerste der Brennstoffe, die Ruhrpreßkohle R, die beste Verdampfung, weil sein Gehalt an flüchtigen Bestandteilen nicht zu niedrig ist, so daß sich die Verbrennung ohne bedeutenden Luftüberschuß bewerkstelligen ließ. Der Wärmeverlust durch die Abwärme der Rauchgase wird selbstverständlich durch den Luftüberschuß beeinflusst. Demgemäß rührt die starke Abnahme dieses Verlustbetrages bei den Versuchen mit der Saarkohle Püttlingen von dem geringen Luftüberschuß her, der bei deren Verbrennung zur Anwendung kam. Dadurch wurde andererseits der Verlust durch unverbrannte Gase unverhältnismäßig groß, was starke Abnahme des Wirkungsgrades der Verdampfung zur Folge hatte. (Bei diesem Versuch war auch die Schichthöhe des großstückigen Brenn-

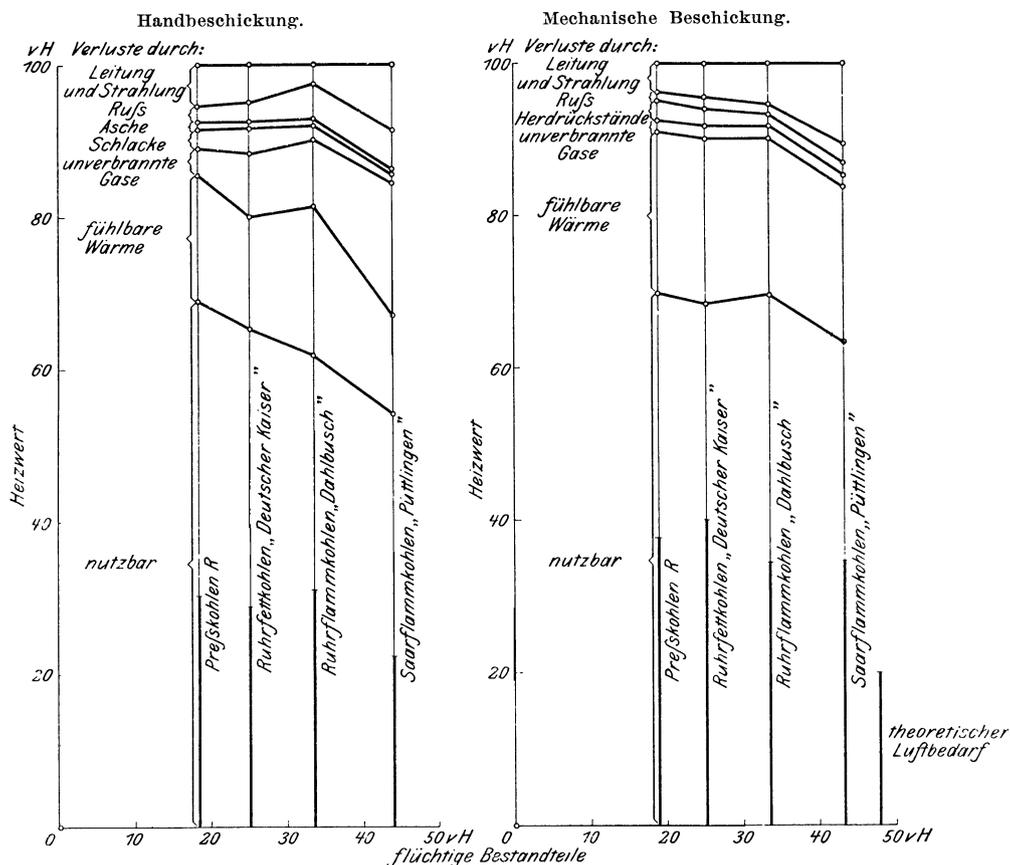


Fig. 13 und 14. Wärmebilanzen der Verdampfversuche in Winterthur.

stoffes etwas zu hoch, 12 bis 15 cm gegenüber 8 bis 12 cm bei den übrigen Kohlen, die in Nußgröße verbrannt wurden). Trotzdem erkennt man auch bei dieser Versuchsreihe wieder die Gesetzmäßigkeit, daß die Wärmeverluste durch unverbrannte Gase mit dem Gehalte der Kohlen an flüchtigen Bestandteilen wachsen.

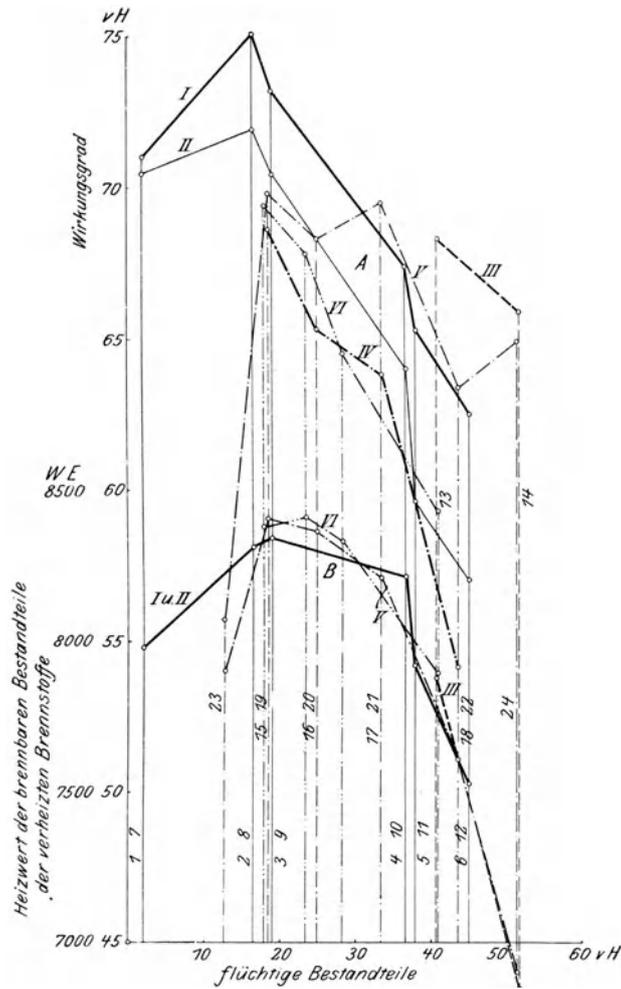
Während die Wärmeverluste durch die Herdrückstände entsprechend dem Aschengehalte der Kohlen nur wenig verschieden sind, nehmen die Verluste durch Ruß wieder sichtbar zu, was sich daraus erklärt, daß die Rußbildung bei langflamigen Steinkohlen bedeutender als bei kurzflamigen ist. Trotz Berücksichtigung des Wärmehaltes des erzeugten Russes finden wir hier wiederum den Wärmeverlust durch Leitung und Strahlung bei der langflamigsten, gasreichsten Kohle am größten.

Die Darstellung der Ergebnisse der Verdampfversuche mit mechanischer Rostbeschiebung, Fig. 14, läßt erkennen, daß der Wirkungsgrad ohne Abzug der Dampfmenge, die der Betrieb zur Unterschubfeuerung erfordert, bei allen untersuchten Brennstoffen gestiegen ist, aber auch hier bei der Kohle, die den höchsten Gehalt an flüchtigen Bestandteilen besitzt, den geringsten Betrag erreicht. In auffallendem Gegensatz zu den Ergebnissen der ersten Versuchsreihe zeigt sich hier, daß die Wärmebeträge für Verluste durch Abwärme, unverbrannte Gase und Ruß bei den vier verschiedenen Brennstoffen ungefähr dieselben sind, wozu bis zu einem gewissen Grade wohl auch der große Luftüberschuß beiträgt, der bei der Saarkohle Püttlingen erforderlich ist. Daß die Verluste durch fühlbare Wärme hier

Zahlentafel 10.

Ordinaten Nr.	Versuchsreihe und Schaulinien Nr.	Brennstoffe	Belastung des Kessels auf 1 qm Heizfläche kg	Heizwert der aschen- und wasserfreien Brennstoffe WE	flüchtige Bestandteile in vH der brennbaren Teile vH	Wirkungsgrad des Kessels vH	
1	I	Gaskoks Luzern	17,1	7979	2,0	71,0	
2	»	Preßkohlen V. G.	17,6	8313	16,5	75,1	Schiffkessel in Luzern
3	»	Preßkohlen H. St.	17,3	8342	19,1	73,7	normaler Betrieb
4	»	Saarkohlen Maybach	17,8	8223	36,7	67,4	Schaulinie I: _____
5	»	Saarkohlen Friedrichsthal	17,2	7915	38,0	65,3	
6	»	Saarkohlen La Houve	17,3	7525	45,1	62,5	
7	II	Gaskoks Luzern	17,6	7979	2,0	70,4	
8	»	Preßkohlen V. G.	23,3	8313	16,5	71,9	Schiffkessel in Luzern
9	»	Preßkohlen H. St.	23,4	8342	19,1	70,4	verstärkter Betrieb
10	»	Saarkohlen Maybach	23,4	8223	36,7	63,9	Schaulinie II: _____
11	»	Saarkohlen Friedrichsthal	23,5	7915	38,0	59,6	
12	»	Saarkohlen La Houve	23,6	7525	45,1	57,0	
13	III	Saarkohlen Klein-Rosseln	12,7	7875	40,9	68,3	Zweiflammrohrkessel in Speicher
14	»	Braunkohlen Penzberg	10,5	6845	51,6	65,3	Schaulinie III: _____
15	IV	Preßkohlen R.	21,2	8386	18,3	68,8	Zweiflammrohrkessel
16	»	Ruhrkohlen Deutscher Kaiser	22,2	8357	25,2	65,3	in Winterthur
17	»	Ruhrkohlen Dahlbusch	21,1	8214	33,6	63,8	Handbeschickung
18	»	Saarkohlen Püttlingen	20,2	7565	44,0	54,1	Schaulinie IV: _____
19	V	Preßkohlen R.	26,9	8427	18,9	69,8	
20	»	Ruhrkohlen Deutscher Kaiser	24,4	8371	25,3	68,3	Zweiflammrohrkessel
21	»	Ruhrkohlen Dahlbusch	25,5	8221	33,4	69,5	in Winterthur
22	»	Saarkohlen Püttlingen	25,1	7675	43,4	63,4	Unterschubfeuerung
23	»	Kokssand Winterthur	16,7	7898	12,8	55,7	Schaulinie V: _____
24	»	Braunkohlen Penzberg	18,4	6843	51,4	64,9	
25	VI	Preßkohlen »Adler« M. A.	23,2	8376	17,9	69,4	
26	»	Ruhrkohlen Konstantin der Große	24,6	8405	23,5	67,8	Cornwallkessel in Winterthur
27	»	Ruhrkohlen Pluto Thieß	24,4	8329	28,3	64,0	Schaulinie VI: _____
28	»	Saarkohlen Merlenbach	24,6	7889	41,0	59,3	

Fig. 15.



A Wirkungsgrade der Verdampfversuche
 B Heizwerte der brennbaren Bestandteile der Versuchskohlen

Versuche am Schiffskessel:

- I ————— normaler Betrieb, Gollseher Rost
- II ————— verstärkter Betrieb, Gollseher Rost

Versuche am Zweiflammrohrkessel:

- III - - - - - Planrost
- IV - · - · - - Planrostfeuerung
- V - · - · - · mechanische Unterschubfeuerung

Versuche am Cornwallkessel:

- VI - - - - - Planrost

Ordinaten

- | | |
|--------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 und 7: Gaskoks Luzern | 17 und 21: Ruhrkohlen Dahlbusch |
| 2 » 8: Preßkohlen V. G. | 18 » 22: Saarkohlen Püttlingen |
| 3 » 9: » H. St. | 23: Kokssand Winterthur |
| 4 » 10: Saarkohlen Maybach | 24: Braunkohlen Penzberg |
| 5 » 11: » Friedrichsthal | 25: Preßkohlen »Adler« M. A. |
| 6 » 12: » La Houve | 26: Ruhrkohlen Konstantin der Große |
| 13: » Klein-Rosseln | 27: Ruhrkohlen Pluto |
| 14: Braunkohlen Penzberg | 28: Saarkohlen Merlenbach |
| 15 » 19: Preßkohlen R. | |
| 16 » 20: Ruhrkohlen Deutscher Kaiser | |

bedeutend erheblicher sind als bei den Versuchen mit Handfeuerung, rührt von der Anwendung von Druckluft her (Ueberdruck unter dem Rost 100 bis 130 mm Wassersäule). Dadurch nehmen jedoch andererseits die Verluste durch unverbrannte Gase und Ruß so erheblich ab, daß es gelingt, mittels dieser Unterschubfeuerung auch die langflammigsten Brennstoffe rauchschwach zu verbrennen, ohne dadurch den Wirkungsgrad der Feuerung zu beeinträchtigen. Der Verlust durch Leitung und Strahlung steigt auch bei dieser Versuchsreihe mit zunehmendem Gasgehalt der Brennstoffe, wobei kaum anzunehmen ist, daß dies allein von den Versuchsfehlern herrührt, die sich allerdings in diesem Verlustposten ansammeln, von denen aber auch nicht angenommen werden kann, daß ihr Betrag in unmittelbarer Beziehung zur Gasgiebigkeit der Versuchskohlen steht.

Wir haben die Wirkungsgrade unsrer sämtlichen Versuche an den drei beschriebenen Kesselanlagen nebst denen einiger Versuche, welche die Ingenieure von Gebrüder Sulzer an einem Cornwallkessel von 70 qm Heizfläche und 2,6 qm Rostfläche mit Planrost ausgeführt haben, mit den Heizwerten der brennbaren Bestandteile und den flüchtigen Bestandteilen der Versuchskohlen in Zahlentafel 10 und in Fig. 15 zusammengestellt, und zwar wiederum als abhängig vom Gasgehalte der Reinkohlen. In Fig. 15 umfaßt die Schauliniengruppe A die Wirkungsgrade bei den Verdampfversuchen, die Gruppe B die Heizwerte der brennbaren Bestandteile der Versuchskohlen.

Die dargestellten Wirkungsgrade entstammen sechs Versuchsreihen. Die zu jeder Reihe gehörenden Ergebnisse sind durch besondere Linien miteinander verbunden. Von den vier Schaulinien der Heizwerte der Reinkohlen sind zwei (die Linien Nr. I und II und IV und V) die Verbindungslinien der Mittelwerte der bei Parallelversuchen verbrannten Heizstoffe. Die zu den Linienpunkten gehörigen Ordinaten sind in derselben Weise wie die Schaulinien gezeichnet. Da die Ordinaten sowohl die in vH ausgedrückten Wirkungsgrade wie die in WE bezifferten Heizwerte der Reinkohlen veranschaulichen, gehören die oberen Punkte zur Wirkungsgrad-Gruppe A, die untern zu den Heizwerten B.

Schon auf den ersten Blick fällt eine gewisse Aehnlichkeit zwischen den Linien-scharen A und B auf. Die genauere Betrachtung lehrt jedoch, daß bei verschiedenen Kesselanlagen und bei verschiedener Belastung desselben Kessels (siehe Zahlentafel 10) die Wirkungsgrade bei derselben Kohle verschieden ausfallen. Bei gleicher Belastung derselben Anlage mit Planrost geben jedoch diejenigen Brennstoffe den höchsten Wirkungsgrad, die auch den höchsten Heizwert der brennbaren Bestandteile aufweisen, nämlich Briketts und Steinkohlen mit 16 bis 23 vH flüchtigen Bestandteilen; der geringste Wirkungsgrad bei der Verdampfung wird dagegen mit den Kohlen erzielt, die den höchsten Gehalt an flüchtigen Bestandteilen besitzen.

Zur Erläuterung dieser Tatsache führen wir noch die Ergebnisse einer Anzahl weiterer Verdampfversuche an, welche die Ingenieure von Gebrüder Sulzer an den beiden erwähnten Versuchskesseln mit wechselnder Belastung vorgenommen haben, s. Zahlentafel 11.

Aus dieser Zusammenstellung wird ersichtlich, daß im allgemeinen bei den Versuchen, bei denen die Kesselbelastung gleich der von uns gewählten war, die erwähnte Beziehung zwischen Gasgehalt der Kohlen und Wirkungsgrad der Feuerung gilt. Auch die Wirkungsgradlinie der Versuche mit der Unterschubfeuerung, Fig. 15, läßt dies deutlich erkennen; doch veranlassen uns die auftretenden Schwankungen, unsre Schlußfolgerungen auf Innenfeuerungen mit Handbetrieb zu beschränken.

Zahlentafel 11.

Brennstoffe	Belastung des Kessels auf 1 qm Heizfläche	Heizwert der aschen- u. wasser-freien Brennstoffe	flüchtige Bestandteile in vH der brennbaren Teile	Wirkungsgrad des Kessels	
	kg	WE	vH	vH	
Ruhrkohlen Graf Beust	20,4	8376	23,7	62,6	} Zweiflammrohrkessel in Winterthur, Handbeschickung
	22,5	8359	22,2	66,0	
	27,2	8376	23,7	64,0	
	28,4	8359	22,2	63,1	
Belg. Preßkohlen S. M. D.	19,8	} 8515	16,0	66,2	} Cornwallkessel in Winterthur.
	26,8			67,0	
Ruhrkohlen Nordstern	21,8	} 8414	16,5	64,3	
	23,3			67,8	
Ruhrkohlen Westhausen	26,4	} 8358	27,9	69,8	
	27,2			68,2	
Yorkshirekohlen Monopol	19,7	} 7957	37,3	58,1	
	21,5			58,2	
	15,2			56,0	
Saarkohlen Merlenbach	17,4	} 7802	39,1	55,5	
	22,6			7889	41

Auch aus Verdampfversuchen, die an andern Orten zu ganz andern Zwecken vorgenommen worden sind, läßt sich erkennen, daß bei Parallelversuchen auf Planrosten mit verschiedenen Brennstoffen die kurzflämmigen (mit Ausnahme von Anthraziten und Koks) die Wärme besser als die langflämmigen ausnutzen lassen. Wir verweisen auf die Jahresberichte des Schweizerischen Vereines von Dampfkesselbesitzern¹⁾ sowie insbesondere auf eine höchst bemerkenswerte Veröffentlichung der Geologischen Landesanstalt der Vereinigten Staaten²⁾. In dieser Arbeit werden die bei Versuchen an zwei Heine-Wasserrohrkesseln mit Planrost gefundenen Wirkungsgrade in Beziehung zu allen möglichen Eigenschaften der verwendeten Kohlen gesetzt. Die Wiedergabe der Figur 50 (S. 89) der erwähnten Abhandlung in Fig. 16

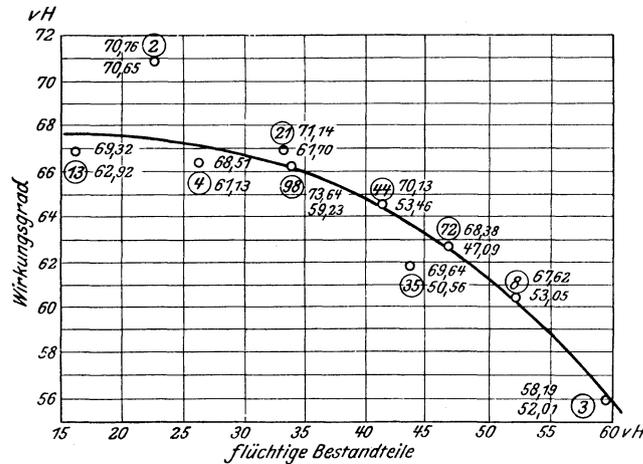


Fig. 16.

¹⁾ Jahrgänge 1904 bis 1907.

²⁾ Bulletin Nr. 325: A study of four hundred steaming tests, made at the Fuel-Testing Plant, St. Louis, in 1904, 1905 and 1906. By Lester P. Breckenridge. Washington 1907.

zeigt die Abhängigkeit der Wirkungsgrade von dem Gehalt der Kohlen an flüchtigen Bestandteilen. Dabei wurden keine Brennstoffe mit weniger als 16 vH flüchtigen Bestandteilen untersucht. Wir sind der Ueberzeugung, daß, falls auch Magerkohlen, Anthrazite und Koks verfeuert worden wären, die Schaulinie auch gegen den Nullpunkt abgefallen wäre und somit mit der unsrigen (s. oben) übereingestimmt hätte. (Die eingekreisten Zahlen bedeuten die Anzahl bei verschiedener Belastung ausgeführter Versuche mit Kohlen von demselben Gasgehalt; die danebenstehenden Zahlen die Grenzwerte der gefundenen Wirkungsgrade.)

In wirtschaftlicher Hinsicht geht aus unsern Versuchen Folgendes hervor: Zur Dampferzeugung sind in Gegenden, die, wie die Schweiz, Württemberg, Norditalien, weit entfernt von den Kohlenzechen liegen und keine Wasserwege besitzen, wo also der Zechenpreis der Kohlen und der Werkpreis der Preßkohlen durch die Frachtkosten fast verdoppelt werden, Brennstoffe mit dem höchsten Heizwert der brennbaren Anteile, also Steinkohlen und Preßkohlen mit 16 bis 23 vH flüchtigen Bestandteilen die wirtschaftlichsten. Denn es lohnt weder, unverbrennliche Bestandteile (Asche) der Brennstoffe, noch überschüssige flüchtige Bestandteile, deren Verbrennungswärme bei Dampfanlagen nicht nutzbar gemacht werden kann, auf große Entfernung zu befördern. Die genannten kurzflämmigen Brennstoffe ermöglichen auch bei Innenfeuerungen mit Handbetrieb die beste Ausnutzung der Wärme. Bei dieser Klasse von Feuerungsanlagen ist die Verwendung von langflämmigen Brennstoffen nur in solchen Betrieben angezeigt, bei denen zeitweilig die Dampferzeugung verstärkt werden muß, was sich mit den rasch brennenden langflämmigen Kohlen leicht bewerkstelligen läßt. An Orten jedoch, wo langflämmige Kohlen billiger als kurzflämmige sind, erweisen sich für natürlichen Zug und Handbeschickung eingerichtete Innenfeuerungen nicht wirtschaftlich wegen der unvermeidlichen Wärmeverluste durch unverbrannte Gase. Am besten wird die Wärme bei langflämmigen Brennstoffen ausgenutzt durch Verwendung von Sekundärluft, Schrägrosten oder, wenn es sich nicht um stark backende Kohlen handelt, von Unterfeuerungen, wie die bei unsern Versuchen in Winterthur erwähnte.

III. Analytischer Teil.

a) Rauchgasanalysen.

Wie bereits eingangs erwähnt, bezweckten unsre Versuche auch, Kenntnis zu gewinnen einerseits über den Einfluß der nach verschiedenen Verfahren erhaltenen Analysenergebnisse auf die Verlustposten der Wärmebilanz, andererseits über die Unterschiede der nach verschiedenen Berechnungsverfahren aufgestellten Wärmebilanzen.

Meist werden die Rauchgase für die Untersuchung an einer bestimmten Stelle in der Mitte des Rauchkanales entnommen, und dabei wird vorausgesetzt, daß die auf diese Weise abgesaugten Rauchgasproben der mittleren Zusammensetzung der Rauchgase entsprechen. Wenn man sich nicht einer besondern Einrichtung zur Probenahme bedient, z. B. des Apparates von Scheurer-Kestner¹⁾ oder des verbesserten Probenehmers, wie der auf S. 157 der erwähnten Arbeit von Breckenridge abgebildete, bringt man bei der Probenahme der Rauchgase eine Unsicherheit in die Beobachtungen hinein, die einen Fehler nach sich zieht, gleichgültig, welches Analysenverfahren angewandt wird. Dabei kann nicht angenommen werden, daß der Betrag dieses Versuchsfehlers bei Versuchen mit verschiedenen Kohlenarten der-

¹⁾ Scheurer-Kestner, Pouvoir calorifique des combustibles, Paris 1896 S. 196.

selbe sei, denn je nach den Zugverhältnissen, Luftüberschüssen u. dergl. werden die Rauchgase verschieden durchmischelt sein. Da es sich für uns darum handelte, die üblichen Verfahren zur Analyse der Rauchgase einer vergleichenden Untersuchung zu unterziehen, wurde bei unsern Winterthurer Versuchen, wo sich die amerikanische Vorrichtung nicht anbringen ließ, behufs möglichst richtiger Probenahme ein 10 cm weites Eisenrohr vor der Uebergangsstelle des Fuchses in den Rauchkanal in diesen eingebaut, s. Fig. 18 und Fig. 8.

Das übliche Verfahren zur Ermittlung der Rauchgaszusammensetzung durch halb- oder viertelstündliche Beobachtungen mittels des Orsat-Apparates eignet sich wohl zur Ueberwachung des Feuerungsganges; es versagt aber, wenn es sich um die Aufstellung einer genauen Wärmebilanz handelt, weil die gefundenen Kohlensäure- und Sauerstoffgehalte nicht immer dem mittleren Gehalt der während des ganzen Versuches entstehenden Verbrennungserzeugnisse an diesen Gasen entsprechen. Die Verfahren der technischen Gasanalyse gestatten auch nicht, den Gehalt der Rauchgase an unverbrannten Gasen genügend genau festzustellen. Hieraus folgt, wie bereits von mehreren Fachmännern betont worden ist, daß es, um eine richtigen Wärmebilanz aufzustellen, nötig ist, die Rauchgase während der ganzen Dauer des Versuches mit gleichmäßiger Geschwindigkeit abzusaugen und genau zu analysieren¹⁾. Das Absaugen kann auf zweierlei Weise geschehen: entweder dadurch, daß man einen großen Gasbehälter mit einer Sperrflüssigkeit füllt und diese während der ganzen Dauer des Versuches gleichmäßig auslaufen läßt und so die Rauchgase in gleichmäßigem Tempo aufsammelt, oder dadurch, daß man nach dem Verfahren von Bunte²⁾ mittels einer kräftigen Wasserstrahlpumpe eine größere Menge Gas ebenfalls während der ganzen Dauer des Versuches durch eine Hauptleitung absaugt und an letztere die Analysenapparate durch Seitenleitungen anschließt. Dieses Verfahren hat vor dem ersterwähnten den Vorzug, daß es ermöglicht, während der Versuchsdauer eine bedeutend größere Menge Gas abzusaugen, von dem angenommen werden kann, daß es infolge der größeren Sauggeschwindigkeit in seiner Zusammensetzung der der gesamten Rauchgase näher kommt als eine in langsamerem Strom entnommene viel kleinere Probe. Diese Versuchsanordnung gestattet ferner gleichzeitige Temperatur- und Zugbeobachtung und Probenahme der Rauchgase, während bei dem üblichen Ansaugen der Rauchgase mittels Pumpe das angesaugte Gas anders zusammengesetzt sein kann als das Rauchgas im Augenblick der Temperatur- und Zugbeobachtungen. Es kommt dies namentlich dann in Betracht, wenn man der Raumverhältnisse halber lange Leitungen anwenden muß.

Diese Gründe veranlaßten uns, bei unsern Versuchen in Winterthur zum Vergleich der verschiedenen Analysenverfahren die durch Fig. 17 und 18 veranschaulichte Anordnung für das Auffangen und Analysieren der Rauchgase zu treffen. In Fig. 18 stellt *A* das oben erwähnte 10 cm weite Eisenrohr dar. Aus diesem wurde das Gas durch ein Glockenfilter mit Glycerinverschluß einerseits dem Ados-Apparat *B* zugeführt, andererseits mittels der Wasserstrahlpumpe *D'* durch die Hauptleitung *C* den Analysenapparaten. Mittels des Ansaugers *F* wurde während der ganzen Dauer des Versuches ein Teil des Rauchgases durch die Buntische Einrichtung *E* für die gravimetrische Analyse geleitet.

¹⁾ Von Apparaten zur ununterbrochenen Entnahme der Rauchgase führen wir unter andern an: denjenigen von Waller, zu beziehen von Dojer & Cie. Rotterdam: das Modell des Vereines für Feuerungsbetrieb und Rauchbekämpfung zu Hamburg (Fabrikanten: Dittmar und Viert Hamburg 15), sowie die von de Grahl beschriebene Vorrichtung. (Bericht über die Sitzung der Kommission zur Prüfung und Untersuchung von Rauchverbrennungsvorrichtungen, Berlin 1894.)

²⁾ Vergl. Haier a. a. O. S. 14 u. f.

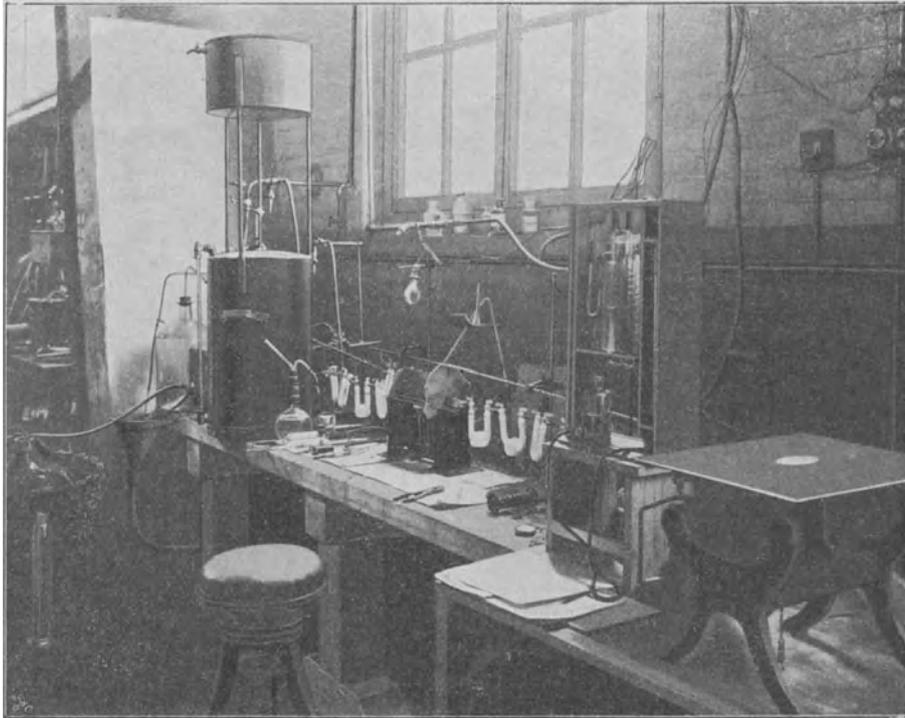


Fig. 17. Versuchseinrichtung.

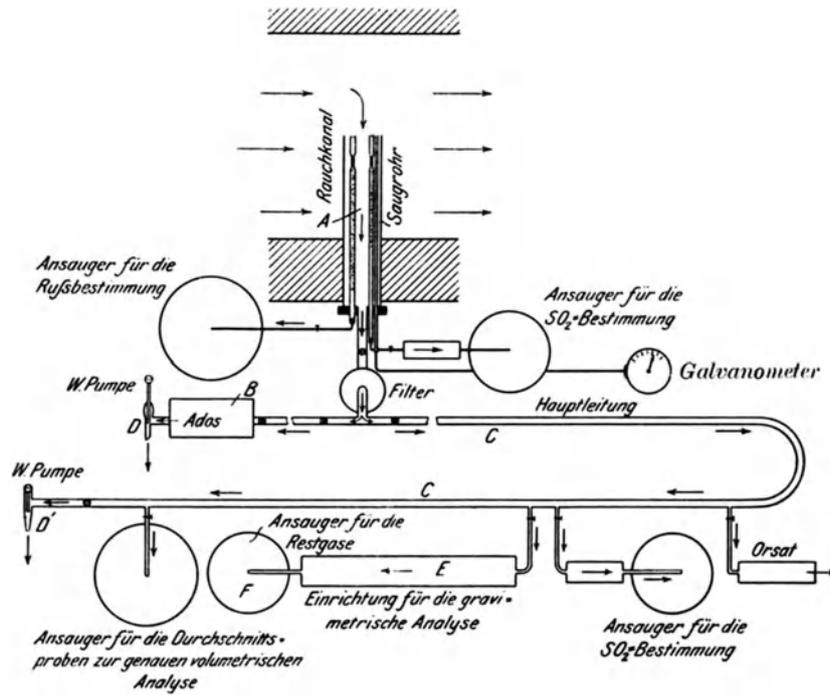


Fig. 18. Versuchsanordnung für die vergleichende Rauchgasanalysen.

Aus der Hauptleitung *C*, Fig. 18 und 19, strömten die Rauchgase zunächst durch ein Glaswollenfilter *a*, hierauf — um sie von Wasser zu befreien — durch zwei Chlorkalziumröhren *b* und *c*, sodann durch zwei abgewogene Dennstedtsche »Enten« *d* und *e* mit Natronkalk, in denen der Kohlensäuregehalt ermittelt wird¹⁾, und gelangten alsdann in ein mit — zur Rotglut erhitztem — Kupferoxyd gefülltes Glasrohr *f*, in dem die unverbrannt gebliebenen Bestandteile (CO, CH₄, H) zu Wasser und Kohlensäure verbrannt wurden, wovon das erstere Verbrennungserzeugnis im Chlorkalzium-

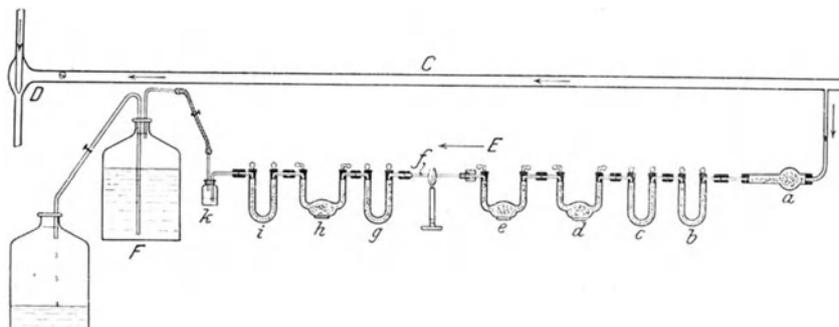


Fig. 19. Einrichtung für die gravimetrische Analyse der Rauchgase (nach Bunte).

rohr *g*, das letztere im Natronkalkrohr *h* aufgefangen und gewogen wurde. Da bei der Wärmebilanz der Fehler, der daraus entsteht, daß das in den Rauchgasen vorhandene CH₄ als CO und H in Rechnung gesetzt wird, sehr klein ist (vergl. Haier), haben auch wir von der fraktionierten Verbrennung der Rauchgase Abstand genommen und die Gewichtszunahme des Rohres *g* als vom Wasserstoff, die des Rohres *h* als vom Kohlenoxydgehalt des Rauchgases herrührend in unsere Rechnung einbezogen. Nach Durchströmen eines mit Chlorkalzium gefüllten Schutzrohres *i* und eines Tropfenzählers *k* gelangte das übrig gebliebene Gas in eine 10 ltr haltende mit Wasser gefüllte Glasflasche *F*, die als Ansauerer eingerichtet war und den Gasstrom gleichmäßig zu regeln gestattete. In diesem Ansauerer sammelte sich das Restgas der Analyse an, dessen Gehalt an Sauerstoff mittels des Orsat-Apparates bestimmt wurde. Bei der zweiten Versuchreihe wandten wir an Stelle eines Glasrohres mit Kupferoxyd zum Verbrennen der brennbaren Anteile der Rauchgase die in Fig. 19 angegebene Drehschmidtsche Platinkapillare *E* an. Die Flasche für das Restgas wurde vor Beginn eines jeden Versuches mit Wasser gefüllt und gewogen; nach Beendigung des Versuches und erfolgtem Druckausgleich wurde nochmals gewogen und aus dem Unterschied der Gewichte sowie der Beobachtung von Temperatur und Barometerstand das Normalvolumen der Restgase berechnet. Die Gewichtszunahmen der Rohre *d* und *e* sind gleich dem Gewichte der Kohlensäure, die in dem durchgesaugten Rauchgas enthalten war. Aus der Gewichtszunahme des Rohres *g* berechneten wir die Menge des Wasserstoffes, aus der des Rohres *h* die des Kohlenoxyds. Die gefundenen Gewichte für CO₂, CO und H wurden auf das Normalvolumen umgerechnet. Bei der Verbrennung des im Rauchgas enthaltenen Kohlenoxyds und Wasserstoffes wird ihr halbes Volumen an Sauerstoff dem Rauchgas entzogen. Addiert man demnach das Restvolumen, die Volumen der gefundenen Mengen CO₂, CO, H, sowie — für verbrauchten Sauerstoff — noch das halbe Volumen von CO+H, so findet man das Gesamtvolumen des Rauchgases, das zur Analyse verwendet wurde, woraus sich dessen Zusammensetzung in Hundertteilen berechnen läßt, wie folgendes Beispiel zeigt:

¹⁾ Dennstedt, Anleitung zur vereinfachten Elementaranalyse 2. Aufl., Hamburg 1906, S. 22. Mitteilungen. Heft 103.

Versuch Nr. 2 vom 12. Februar 1908 mit Ruhrpreßkohle
Rosenblumendelle.

a) Handbeschickung.

- 1) Zunahme der Rohre *d* und *e* = 1,1291 g CO₂ = 0,5746 ltr CO₂
 2) » des Rohres *g* = 0,0122 » H₂O = 0,0152 » H₂
 3) » » » *h* = 0,0540 » CO₂ = 0,0275 » CO

demnach zur Verbrennung von 2) und 3) verbrauchter Sauerstoff

$$\frac{0,0152 + 0,0275}{2} \dots \dots \dots = 0,0219 \text{ » O}_2$$

Restgase (O₂ + N₂) = 5,163 ltr bei 25,1° C und 730 mm Quecksilbersäule (berichtigt).

$$\text{Normalvolumen trocken } \frac{5163 (730 - 23,7) \cdot 273}{760 (273 + 25,1)} = 4,3942 \text{ ltr.}$$

Das Restgas setzt sich zusammen aus

- 9,20 vH O₂ = 0,4043 » O₂
 91,80 » N₂ = 3,9899 » N₂
 also Gesamtvolumen = 5,0334 ltr.

Hieraus: Zusammensetzung des Rauchgases:

- CO₂ = 11,42 Vol.-vH
 CO = 0,55 »
 H = 0,24 »
 O = 8,47 »
 N = 79,32 »
 100,00 Vol.-vH¹⁾.

Wenn es sich um die Untersuchung der Rauchgase von mehr als einem Verdampfungsversuche handelt, läßt sich das soeben beschriebene Verfahren nur dort anwenden, wo eine genaue analytische Wage zur Verfügung steht. Wo dies nicht der Fall ist, kann man in der Weise verfahren, daß man während der ganzen Versuchsdauer eine große Probe des Rauchgases in ein Sammelgefäß absaugt und die Probe im chemischen Laboratorium, wie oben beschrieben, entweder gravimetrisch oder volumetrisch analysiert. Bei dem gewöhnlich geringen Gehalte der Rauchgase an verbrennlichen Bestandteilen ist die Bestimmung auf volumetrischem Wege weniger genau als auf gravimetrischem, weil im letzteren Falle die Verbrennungserzeugnisse beliebig großer Gasvolumen gewogen werden können.

Bei unsern Versuchen diente zu diesem Zwecke der in Fig. 17 abgebildete Ansauger: ein 60 ltr fassender Gasbehälter aus Kupfer, der vor dem Versuche mit rauchgasgesättigtem Wasser oder mit 50-prozentigem Glycerin gefüllt worden war. Nach beendigtem Versuche wurde der Inhalt des Gasbehälters gut umgeschüttelt

¹⁾ Für die Umrechnung der gefundenen Gewichte der Verbrennungsgase auf die Volumen der vorhandenen Rauchgasbestandteile kann man sich der Avogadro'schen Regel bedienen, wonach in gleichen Raunteilen aller Gase bei gleichem Druck und gleicher Temperatur gleich viel Moleküle enthalten sind. Bei 0° C und 760 mm Quecksilbersäule sind in 22,4 ltr enthalten: 44 g CO₂, 2 g H₂, entsprechend 18 g H₂O, 28 g CO, entsprechend 44 g CO₂. Obige Rechnung gestaltet sich demnach wie folgt:

gefunden

$$\begin{array}{ll} \text{CO}_2 & 1,1291 \text{ g CO}_2 : x \text{ ltr} = 44 \text{ g CO}_2 \quad : 22,4 \text{ ltr}; \quad x = 0,5746 \text{ ltr CO}_2 \\ \text{H}_2 & 0,0122 \text{ g H}_2\text{O} : y \text{ ltr} = 18 \text{ g H}_2\text{O} (= 2 \text{ g H}_2) : 22,4 \text{ ltr}; \quad y = 0,0152 \text{ ltr H}_2 \\ \text{CO} & 0,0540 \text{ g CO}_2 : z \text{ ltr} = 44 \text{ g CO}_2 (= 28 \text{ g CO}) : 22,4 \text{ ltr}; \quad z = 0,0275 \text{ ltr CO} \end{array}$$

und eine 10 ltr haltende Gasflasche sowie eine Anzahl von Proberöhren mit dem Gase gefüllt. Ferner wurde der Kohlensäure- und Sauerstoffgehalt der Gasprobe im Gasbehälter vor und nach dem Umfüllen mittels des Orsat-Apparates bestimmt, wobei Unterschiede in der Zusammensetzung nicht zu erkennen waren. Die Gasproben in den kleinen Proberöhren analysierten wir mit dem Hempelschen Apparat für genaue Gasanalyse über Quecksilber¹⁾ unter Anwendung von Drehschmidtschen Absorptionspipetten. Die unverbrannten Gase wurden durch Verbrennen mittels der Drehschmidtschen Platinkapillare²⁾ ermittelt. Die erhaltenen Ergebnisse finden sich in den Zahlentafeln 12 und 13.

Den Inhalt der 10 ltr-Flasche untersuchten wir im Laboratorium in derselben Weise, wie wir oben bei der Beschreibung der Buntischen Versuchsanordnung angegeben und wie dies Eberle und Zschimmer in ihrer Abhandlung »Verluste durch Unverbranntes in den abziehenden Heizgasen«³⁾ ausführlich beschrieben haben. Die 10 ltr-Flasche wurde schon vor dem Aufsammeln des Gases derart mit Zu- und Ableitungsröhren versehen, daß sie im Laboratorium ohne Mühe an die Analysengeräte angeschlossen werden konnte; s. Fig. 20.

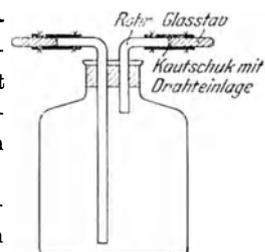


Fig. 20.

Da bei dieser Versuchsanordnung Wasser als Sperrflüssigkeit verwendet wurde, war ein Teil der ursprünglich im Rauchgas vorhandenen Kohlensäure vom Wasser verschluckt worden, z. B. betrug in einem Falle der Kohlensäuregehalt des Rauchgases vor Beginn dieser gravimetrischen Analyse 10,4 vH, unmittelbar nach Beendigung der Analyse nur noch 6,9 vH. Hieraus folgt, daß das aus dem Gewichtsunterschied der Vorratflasche vor und nach dem Versuch berechnete Normalvolumen des Rauchgases zu klein gefunden wird und darum auch die Volumenteile der unverbrannten Bestandteile des Gases zu hoch ausfallen. Dieser Fehler läßt sich durch eine Berichtigung für die gelöste Kohlensäure nach Eberle und Zschimmer verringern. Man kann ihn vollständig vermeiden, wenn man als Sperrflüssigkeit nicht Wasser, sondern Glycerin (50 bis 100 vH) oder ein andres Sperrmittel, das keine Kohlensäure löst, anwendet. Aus dem Gesagten folgt aber auch, daß man als Kohlensäuregehalt des Rauchgases entweder das Mittel aus sämtlichen Orsat-Bestimmungen oder besser — wie wir es getan haben — den Kohlensäuregehalt des Gasbehälterinhaltes einsetzen muß, wobei man aber ebenfalls eine Sperrflüssigkeit anwenden wird, die Kohlensäure nicht löst. Wie unsre Versuche zeigen, entspricht rauchgasgesättigtes Wasser keineswegs dieser Anforderung. Deshalb haben wir bei unsrer zweiten Versuchsreihe die Rauchgase auch noch über 50prozentigem Glycerin aufgesammelt.

Zahlentafel 12 und 13 zeigen die Ergebnisse der nach den besprochenen Analysenverfahren gefundenen Zusammensetzungen der Rauchgase. Aus Spalte 3 der Zahlentafel 12 ersieht man, daß der Kohlensäuregehalt der über rauchgasgesättigtem Wasser aufgesammelten Gase meistens zu niedrig gefunden wird. Es kann aber auch vorkommen, daß, wie beim Versuche mit der Kohle Dahlbusch, die Sperrflüssigkeit Kohlensäure an das Gas abgibt. Im Gegensatz dazu zeigen die entsprechenden Werte der Zahlentafel 13, in der die Kohlensäuregehalte der unmittelbar analysierten und der über Glycerin aufgesammelten Rauchgase aufgeführt sind, praktisch vollständige Uebereinstimmung.

¹⁾ Hempel: Gasanalytische Methoden.

²⁾ Treadwell: Lehrbuch der analyt. Chemie Bd. II.

³⁾ Zeitschr. des Bayer. Rev.-Vereines 1906 S. 123 u. f.

Zahlentafel 12. Zusammensetzung der Rauchgase.

1	2	3	4	5	6	7	8
Probenahme	Analysenverfahren	CO ₂	CO	CH ₄	H	O	N
entnommen nach Bunte aufgesammelt über rauch- gasgesättigtem Wasser	gravimetrisch aus Proberöhren volumetrisch aus 10 ltr.-Flasche gravimetrisch aus 10 ltr.-Flasche volumetrisch	11,42	0,55	—	0,24	8,47	79,31
		10,80	0,67	0,16	0,11	7,60	80,66
		10,80	0,44	—	0,34	7,60	80,82
entnommen nach Bunte aufgesammelt über rauch- gasgesättigtem Wasser	gravimetrisch aus Proberöhren volumetrisch aus 10 ltr.-Flasche gravimetrisch aus 10 ltr.-Flasche volumetrisch	11,30	1,01	—	0,76	7,01	79,92
		10,60	0,83	—	0,63	7,70	80,24
		10,60	0,77	—	0,65	7,70	80,38
entnommen nach Bunte aufgesammelt über rauch- gasgesättigtem Wasser	gravimetrisch h volumetrisch	9,93	1,14	—	0,72	10,38	77,82
		10,40	1,20	—	0,72	7,40	80,28
entnommen nach Bunte aufgesammelt über rauch- gasgesättigtem Wasser	gravimetrisch aus Proberöhren volumetrisch aus 10 ltr.-Flasche gravimetrisch aus 10 ltr.-Flasche volumetrisch	11,83	3,45	—	1,51	4,10	79,09
		10,23	3,95	0,32	1,32	4,60	79,58
		10,23	4,29	—	2,16	4,88	78,54
		10,23	3,31	0,77	0,89	4,88	79,92

33

Zahlentafel 13.

Zusammensetzung der Rauchgase der Verdampfversuche mit Unterschubfeuerung.

1	2	3	4	5	6	7	8
aufgesammelt	Analysenverfahren	CO ₂	CO	CH ₄	H	O	N
nach Bunte	gravimetrisch volumetrisch	9,70	0,04	—	0,25	10,66	79,32
über 50 vH Glycerin		9,70	0,07	—	0,17	9,60	80,43
nach Bunte	gravimetrisch volumetrisch	10,34	0,02	—	0,32	10,07	79,25
über 50 vH Glycerin		10,10	0,05	0,05	—	8,80	81,00
nach Bunte	gravimetrisch volumetrisch	10,21	0,03	—	0,27	10,60	78,86
über 50 vH Glycerin		9,80	0,18	0,06	—	9,40	80,53

Eine Betrachtung der nach den verschiedenen Analysenverfahren gefundenen Gehalte an unvollständig verbrannten Gasen, Spalte 4, 5 und 6 der Zahlentafeln 12 und 13, zeigt, daß die wahrnehmbaren Unterschiede im allgemeinen nicht größer sind als der Betrag der unvermeidlichen Versuchsfehler. Bei Versuchen, wie die mit mechanischer Beschickung, bei denen der Gehalt der Rauchgase an unvollständig verbrannten Gasen sehr gering ist, gibt von den besprochenen Analysenverfahren nur das gravimetrische brauchbare Werte.

Nach obigem halten wir — um eine genaue Wärmebilanz aufzustellen — die gravimetrische Analyse für das einfachste und sicherste Verfahren zur Ermittlung der Zusammensetzung der Rauchgase. Die Untersuchung ist entweder nach Bunte an Ort und Stelle auszuführen oder mit Durchschnittsproben, die mit keiner Sperrflüssigkeit in Berührung kommen, welche Kohlensäure lösen kann. Für diesen Zweck eignet sich nach unsern Erfahrungen das von verschiedenen Autoren empfohlene¹⁾ 50-prozentige Glycerin.

Zahlentafel 14.

	Analyse nach Bunte	Gasbehälter über Rauchgaswasser	Mittel der viertelstündlich. Orsat-Proben	Mittelwerte des Ados	
CO ₂ vH	11,4	10,8	13,1	12,7	Ruhrpreßkohle Rosenblumendelle
O ₂ »	8,5	7,6	5,8	—	
Summe	19,9	18,4	18,9	—	
CO ₂ vH	11,3	10,6	11,4	11,8	Ruhrfettkohle Deutscher Kaiser
O ₂ »	7,0	7,7	7,4	—	
Summe	18,3	18,3	18,8	—	
CO ₂ vH	9,9	10,4	12,6	12,8	Ruhrflammkohle Dahlbusch
O ₂ »	10,4	7,4	5,3	—	
Summe	20,3	17,8	17,9	—	
CO ₂ vH	11,8	10,6	13,0	13,0	Saarflammkohle Püttlingen
O ₂ »	4,1	5,3	4,1	—	
Summe	15,9	15,9	17,1	—	

Zahlentafel 15.

	Analyse nach Bunte	Gasbehälter über 50 vH-Glycerin	Gasbehälter über Rauchgaswasser	viertelstündliche Orsat-Probe	Mittelwerte des Ados	
CO ₂ . . vH	9,7	9,7	8,6	10,0	10,0	Ruhrpreßkohle Rosenblumendelle
O ₂ . . »	10,7	9,6	9,8	9,5	—	
Summe	20,4	19,3	18,4	19,5	—	
CO ₂ . . vH	9,1	9,0	8,2	9,0	9,3	Ruhrfettkohle Deutscher Kaiser
O ₂ . . »	10,2	10,5	10,4	10,8	—	
Summe	19,3	19,5	18,6	19,8	—	
CO ₂ . . vH	10,3	10,1	9,9	10,9	10,0	Ruhrflammkohle Dahlbusch
O ₂ . . »	10,1	8,8	8,6	8,3	—	
Summe	20,4	18,8	18,5	19,2	—	
CO ₂ . . vH	10,2	9,8	9,6	10,6	10,8	Saarflammkohle Püttlingen
O ₂ . . »	10,6	9,4	9,1	8,7	—	
Summe	20,8	19,2	18,7	19,3	—	

¹⁾ Seiffart, a. a. O.; Bone u. Wheeler, Journ. Soc. Chem. Ind. 1908 S. 10 u. f.; Journ. f. Gasbel. u. Wasservers. 1908 S. 207; Dosch, Brennstoffe, Feuerungen und Dampfkessel, Hannover 1907, s. auch de Grahl, a. a. O.

Für gewöhnlich genügt zur Aufstellung einer Wärmebilanz die Ermittlung des Gehaltes der Rauchgase an Kohlensäure und Sauerstoff. Je nach dem Verfahren, dessen man sich bedient, fallen diese Werte jedoch verschieden aus, wie ein Blick auf die Zahlentafeln 14 und 15 zeigt, worin wir die Ergebnisse der viertelstündlichen Orsat-Beobachtungen und der Aufzeichnungen des Ados-Apparates zusammengestellt haben mit den Orsat-Analysen unsrer über rauchgasgesättigtem Wasser (in Zahlentafel 15 auch über Glycerin) aufgesammelten Gasproben und mit den gravimetrisch gefundenen Kohlensäure- und Sauerstoffgehalten unsrer Rauchgase, die alle an der gleichen Stelle im Rauchkanal gefaßt wurden; s. Fig. 18.

Beide Zahlentafeln lassen erkennen, daß der Kohlensäuregehalt der über rauchgasgesättigtem Wasser aufgesammelten Proben allgemein zu niedrig ausfällt. Das Mittel aus den viertelstündlichen Orsat-Beobachtungen wie das der Angaben des Ados-Apparates ist, wie aus Zahlentafel 14 ersichtlich, höher als die nach dem gravimetrischen Verfahren gefundenen Kohlensäuregehalte. Daß letzteres aber richtige Werte liefert, geht aus Zahlentafel 15 hervor, in der die gewichtanalytischen Ergebnisse vollkommen mit denen des Orsat und des Ados übereinstimmen. In dieser Zahlentafel sind die Kohlensäure- und Sauerstoffgehalte der Versuche vereinigt, die mit der Unterschubfeuerung ausgeführt wurden und nach denen die Verbrennung während der ganzen Versuchsdauer viel gleichmäßiger und vollständiger war als bei den Versuchen mit Handbeschickung. Uns will demnach scheinen, daß bei Feuerungen, bei denen die Zusammensetzung der Rauchgase sich von Minute zu Minute stark ändert, viertelstündliche Beobachtungen mittels des Orsat-Apparates sowie die Aufzeichnungen des Ados zu hohe Mittelwerte für Kohlensäure ergeben. Wir halten es demnach auch zum Aufstellen abgekürzter Wärmebilanzen für empfehlenswert, den Kohlensäuregehalt der Rauchgase in einer über Glycerin oder dergl. aufgesammelten Durchschnittsprobe zu bestimmen. Für die Beobachtung des Feuerungsganges dagegen sind Immediatproben mit zuverlässigen mechanischen Vorrichtungen oder mit dem Orsat-Apparate unerlässlich.

b) Rußbestimmung.

Zur Ermittlung des in den Rauchgasen enthaltenen Russes verfahren wir nach Bunte und Eberle und Zschimmer, indem wir, wie in Fig. 18 angedeutet, mittels eines rd. 20 ltr haltenden Glasgefäßes, das als Ansauger eingerichtet war, die Rauchgase durch ein 1 m langes Verbrennungsrohr aus schwer schmelzbarem Glase leiteten. Das Rohr war in der Nähe des einen Endes mit einer Einschnürung versehen, hinter der sich eine etwa 30 cm lange lockere Schicht von Faserasbest befand, der mit Salzsäure gereinigt und mit Wasser ausgekocht war. Der Asbest hielt den Ruß zurück. Nach Beendigung jedes Versuches wurde der geringe Anflug von Ruß, der sich vor der Verjüngung im Rohr abgesetzt hatte, mit Asbest in das Rohr hineingespült und das hintere Ende des Rohres im Laboratorium mit Kupferoxyd und Bleichromat gefüllt, so daß es ohne weiteres zur Elementaranalyse verwendet werden konnte. Aus der Menge der gefundenen Kohlensäure und dem auf 0° C und 760 mm Quecksilbersäule umgerechneten Volumen des Rauchgases im Ansauger wurde die Gewichtsmenge Ruß in 1 cbm Rauchgas und daraus der durch die Rußbildung bedingte Wärmeverlust berechnet.

Beispiel. Versuch 1 mit Ruhrfettkohle Deutscher Kaiser. Gewicht des aus dem Aspirator ausgelaufenen Wassers 20,42 kg. Temperatur 38° C, Barometerstand 730 mm, berichtet.

Daraus berechnet sich das Normalvolumen des trocknen Rauchgases zu

$$V_0 = \frac{20 \cdot 42 (730 - 49 \cdot 4) \cdot 273}{760 + (273 + 38)} = 16,07 \text{ ltr.}$$

Gewicht der bei der Elementaranalyse gefundenen Kohlensäure 0,1253 g, entsprechend 0,03417 g C.

In 1 cbm Rauchgas sind demnach enthalten 2,126 g C; deshalb beträgt der Wärmeinhalt von 1 cbm in Form von Ruß $2,126 \cdot 8,100 = 17,224$ WE.

Zahlentafel 16 enthält die so ermittelten Rußgehalte der Rauchgase und deren Wärmeinhalte in Form von Ruß in 1 cbm.

Zahlentafel 16.

	Versuche mit Handbeschiekung		Versuche mit mechanischer Beschiekung	
	Ruß auf 1 cbm Rauchgas g	Wärmeinhalt auf 1 cbm Rauchgas WE	Ruß auf 1 cbm Rauchgas g	Wärmeinhalt auf 1 cbm Rauchgas WE
Ruhrpreßkohle Rosenblumendelle .	1,6310	13,21	0,6537	5,30
Ruhrfettkohle Deutscher Kaiser .	2,1260	17,22	0,8774	7,11
Ruhrflammkohle Dahlbusch . . .	3,4381	27,85	0,8684	7,03
Saarflammkohle Püttlingen . . .	5,5026	44,57	1,6756	13,57

Wie bereits eingangs erwähnt, hat sich unsre Erwartung, daß der Restverlust durch Leitung und Strahlung bei allen Versuchen an derselben Kesselanlage unter Berücksichtigung des Wärmeverlustes durch den Ruß annähernd gleich ausfallen werde, nicht bestätigt; denn der Restverlust schwankt zwischen 2,6 und 10,7 vH der Gesamtwärme. Hingegen zeigt Fig. 21, in der die flüchtigen Bestandteile der

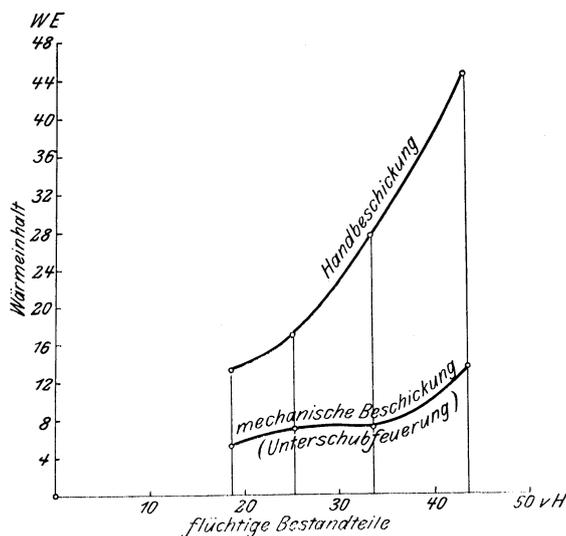


Fig. 21. Wärmeinhalt an Ruß auf 1 cbm Rauchgas bei den Versuchen in Winterthur.

Brennstoffe als Abszissen, die in WE ausgedrückten Wärmeinhalte des in 1 cbm Rauchgas enthaltenen Russes als Ordinaten aufgetragen sind, deutlich, daß dieser Wärmeinhalt abhängig von der Menge der flüchtigen Bestandteile der verbrannten Kohle ist und auch im Zusammenhang mit dem Feuerungsverfahren steht.

Die sichtbare Rußbildung, die bei langflämmigen Kohlen größer ist als bei kurzflämmigen, kann demnach als Maßstab für den Rußgehalt gleicher

Volumen Rauchgas dienen; sie gibt aber deshalb keinen sicheren Anhalt für den durch den Ruß bedingten Wärmeverlust, weil für die Wärmebilanz das Gesamtvolumen der durch die Gewichtseinheit des verfeuerten Brennstoffes erzeugten Rauchgase ausschlaggebend ist.

c) Analyse der Herdrückstände.

Nach den »Normen für Leistungsversuche an Dampfkesseln und Dampfmaschinen« wird der Wärmeverlust durch Unverbranntes in den Herdrückständen aus deren Gewicht und dem Gehalte einer Durchschnittprobe an unverbrannten Bestandteilen berechnet, indem man das Verbrennliche als Kohlenstoff mit 8100 WE/kg in Rechnung setzt. Um festzustellen, in welchem Verhältnis diese Zahl 8100 zum kalorimetrisch bestimmten Heizwerte der Herdrückstände steht, haben wir die Rückstände bei fast allen unsren Versuchen der Elementaranalyse unterworfen und ihren Heizwert mittels der kalorimetrischen Bombe bestimmt. Die gefundenen Werte sind in den Zahlentafeln 1, 4 und 8 enthalten. Das Mittel der auf 1 kg »Verbrennliches« umgerechneten Heizwerte fanden wir = 7828 WE, den Höchstwert = 8042 WE, den Mindestwert = 7580 WE.

Enthalten die Heizstoffe nicht mehr als 10 vH Aschenbestandteile, so begeht man also keinen nennenswerten Fehler bei Aufstellung der Wärmebilanz, wenn man den Wärmeverlust durch Unverbranntes in den Herdrückständen nach den »Normen« berechnet.

Auch zum Berechnen des verbrannten Kohlenstoffes genügt es, das Verbrennliche in den Herdrückständen als reinen Kohlenstoff vom Kohlenstoffgehalt der verfeuerten Kohlen abzuziehen; dagegen liegt kein Grund vor, diesen Wärmeverlust aus dem Gehalte der Herdrückstände an Verbrennlichem durch Multiplikation dieses Gehaltes mit dem Heizwerte der verfeuerten Kohle zu berechnen, wie dies Maercks¹⁾ tut, weil die Herdrückstände, wie unsre Analysen zeigen, die Kohlen in mehr oder weniger entgastem Zustande, demnach nicht mit ihrem ursprünglichen Heizwerte enthalten.

IV. Berechnung der Wärmeverluste nach verschiedenen Verfahren.

a) Die Verluste durch die fühlbare Wärme der Rauchgase.

In den meisten Fällen begnügt man sich bei der Feuerungsüberwachung damit, den gesamten Wärmeverlust durch die Rauchgase annäherungsweise durch Bestimmung ihres mittleren Kohlensäuregehaltes und durch Messung ihrer Abgangtemperatur sowie der Kesselhaustemperatur zu ermitteln, wobei man den von der unvollständigen Verbrennung der Brennstoffe herrührenden Gehalt der Rauchgase an unverbrannten Anteilen außer Betracht läßt. Wenn man in dieser Weise verfahren will, was insbesondere bei Versuchen, bei denen keine erheblichen Mengen unverbrannter Gase auftreten, zu brauchbaren Näherungswerten führt, kann man von einer chemischen Analyse der Brennstoffe Abstand nehmen und nach der Siegertschen²⁾ Formel

$$V = 0,65 \frac{T-t}{CO_2}$$

den Wärmeverlust in Hundertteilen des Heizwertes der Kohle mit genügender Annäherung berechnen (vergl. Zahlentafel 17).

¹⁾ Z. 1909 S. 128.

²⁾ Z. 1888 S. 1099.

Eine Modifikation der Siegertschen Formel stellt die von Hassenstein¹⁾ aufgestellte Gleichung

$$q_v = \frac{\left((c_p)g + \frac{k}{100} 0,36 (c_p) W \right) (T-t)}{13,80 - 0,217 k_1 - 0,661 o}$$

dar. Auch diese Formel ist nur für den Fall aufgestellt worden, daß weder unverbrannte Gase noch Ruß auftreten. Für den letzteren, allgemeineren Fall ändert Hassenstein die Siegertsche Formel um in

$$q_v = 0,65 \frac{(T-t)}{k_1 + k_2 + ch_4 + 0,33}$$

In diesen Gleichungen bedeutet

- q_v den Wärmeverlust in vH des Heizwertes,
 - $(c_p)g$ die mittlere spezifische Wärme für das Temperaturgebiet $t^0 - T^0$ bei unveränderlichem Druck für 1 cbm Rauchgas,
 - $(c_p)W$ die mittlere spezifische Wärme für das Temperaturgebiet $t^0 - T^0$ bei unveränderlichem Druck für 1 cbm Wasserdampf,
 - k_1 den mittleren Kohlensäuregehalt
 - k_2 » » Kohlenoxydgehalt
 - ch_4 » » Methangehalt
 - o » » Sauerstoffgehalt
- } in Volumhundertteilen,
- T die Temperatur der abziehenden Rauchgase,
 - t » » » Verbrennungsluft.

Die zweite Gleichung setzt also eine vollständige Analyse der Rauchgase voraus.

Eine für den gleichen Zweck von Lunge²⁾ vorgeschlagene Formel lautet:

$$WV = 1,854 (t' - t) C + 1,854 (t' - t) \left(\frac{100-n}{n} \right) C'$$

in vH der theoretischen vom Kohlenstoff abgegebenen Wärme:

$$\frac{100 WV}{8000}$$

Darin bedeutet

- n die Volumen-vH CO_2 t' bis $150^\circ C = 0,41$
 - t » Temperatur der Luft 150 » $200^\circ C = 0,43$
 - t' » » » Rauchgase 200 » $250^\circ C = 0,44$
 - C » spez. Wärme von CO_2 250 » $300^\circ C = 0,45$
 - C' » » » O oder N 300 » $350^\circ C = 0,46$
- = 0,31

Diese Formel gestattet nur die Berechnung des Verhältnisses der Wärmeverluste mit einer und derselben Kohle oder mit sehr ähnlich zusammengesetzten Brennstoffen. Dabei wird der berechnete Wärmeverlust in Hundertteilen der theoretisch vom Kohlenstoff abgegebenen Wärme ausgedrückt. Er steht somit nicht in Beziehung zum Heizwert oder zum Kohlenstoffgehalt des verfeuerten Brennstoffes, kann also auch nicht für die Aufstellung einer Wärmebilanz dienen. Letzteres gilt auch für die von Bunte herrührende Tafel zur Berechnung des Brutto-Wirkungsgrades der

¹⁾ Z. für Dampfkessel- und Maschinenbetrieb 1909 S. 281 bis 283; 1910 S. 15 ff.

²⁾ Z. f. ang. Chemie 1889 S. 240; Lunge und Berl, Taschenbuch für die anorgan.-chem. Großindustrie, 4. Aufl. S. 125.

Feuerungen (mithin auch ihres Brutto-Wärmeverlustes) aus dem CO₂-Gehalt und den Abgangtemperaturen der Rauchgase¹⁾.

Die Berechnung des Wärmeverlustes durch die Heizgase aus 1 kg Brennstoff nach der in den »Normen« angegebenen Gleichung²⁾

$$V = \left(0,32 \frac{C}{0,536 k} + 0,48 \frac{9H + W}{100} \right) (T - t) \text{ WE}$$

setzt eine Elementaranalyse des Brennstoffes und eine technische Rauchgasanalyse voraus. Bei dieser Formel wird eine vollständige Verbrennung des Kohlenstoffes zu Kohlensäure angenommen und die Aenderung der Wärmekapazität der gebildeten Rauchgase mit der Temperatur außer Acht gelassen. Ermittelt man, wie dies in den »Normen« vorgeschlagen wird, den Gehalt der Herdrückstände an brennbaren Bestandteilen und kürzt um diesen gefundenen Betrag das C der Verbandsformel, so bleibt noch der von der Nichtberücksichtigung der auftretenden unverbrannten Gase herrührende Fehler.

Eberle hat in der Zeitschrift des Bayerischen Dampfkessel-Revisionsvereines 1902 S. 25/26 angegeben, daß die Verbandsformel nur richtig sei, falls sich die Brenngeschwindigkeit proportional dem Kohlensäuregehalt der Rauchgase ändere. Dagegen hat Haier³⁾ nachgewiesen, daß die Abweichungen zwischen den nach der Verbandsformel und den nach der Eberleschen Formel berechneten Wärmeverlusten gering sind und erst bei einem Betrage von 30 vH des Heizwertes der Kohle mehr als 1 vH betragen.

Neuerdings hat Kaufhold⁴⁾ aus den Beziehungen zwischen Kohlenstoffgehalt und Heizwert für deutsche Steinkohlen die Gleichung

$$\text{Kohlenstoff} = \frac{\text{Heizwert} - 350}{90 \cdot 60}$$

abgeleitet. Er berechnet also aus dem Heizwerte den Kohlenstoffgehalt der entsprechenden Probe, was nach unseren Erfahrungen zu Werten führt, welche von den durch die Elementaranalyse gefundenen um nicht mehr als ± 2 vH abweichen.

Für Kohlenstoffgehalte von 50 bis 90 vH und Kohlensäuregehalte der Rauchgase von 6 bis 16 vH stellt er die Werte von $\left(0,32 \frac{C}{0,536 k} + 0,48 \frac{9H + W}{100} \right)$ auf Grund der Analysen von 6 verschiedenen Kohlensorten zeichnerisch dar.

In jüngster Zeit hat auch Frederking⁵⁾ die Beziehung zwischen Kohlenstoffgehalt und Heizwert von Braunkohlen, Braunkohlenbriketts und Steinkohlen zeichnerisch dargestellt und dafür die Gleichung der Geraden

$$J = 0,0097 x + 5$$

abgeleitet, worin J den Kohlenstoffgehalt und x den kalorimetrisch gefundenen Heizwert der betreffenden Kohlenprobe bedeutet. Außerdem stellt er für den Zusammenhang zwischen Heizwert und Verbrennungs- oder Gesamtwasser des Brennstoffes die Gleichung der Geraden

$$J = 89,8 - 0,00652 x$$

auf, worin J Gewichtprocente an Gesamtwasser ($9H + W$) und x den Heizwert bedeuten. Mit diesen Frederking'schen Gleichungen läßt sich also, wenn entweder

¹⁾ Journ. für Gasbel. u. Wasservers. 1878 S. 62; Muspratt, Technische Chemie, 4. Aufl. Bd. 4 S. 315.

²⁾ Normen für Leistungsversuche an Dampfkesseln und Dampfmaschinen, Z. 1900 S. 669 u. f.

³⁾ Z. 1905 S. 24 u. 25.

⁴⁾ Stahl u. Eisen 1909 S. 1346 u. f.

⁵⁾ Z. für Dampfkessel- und Maschinenbetrieb 1909 S. 498 u. f.

der Kohlenstoffgehalt oder der Heizwert des Brennstoffes bekannt ist, der Wärmeverlust in WE pro kg Brennstoff und pro °C Temperaturdifferenz ebenfalls nach der in den Normen angegebenen Formel berechnen. Den so berechneten Wärmeverlust hat Frederking für verschiedene Kohlensäuregehalte der Rauchgase in Kurven aufgetragen¹⁾. Wie Frederking selbst angibt, handelt es sich hier nur um Durchschnittswerte, welche die Einzelwerte nicht ersetzen können, aber für Ueberschlagrechnungen der Praxis oft sehr brauchbar sein dürften.

Aus dem, mittels der Rauchgasanalyse bestimmbaren Verhältnis der verbrauchten zur theoretisch erforderlichen Luftmenge φ , der mittleren spezifischen Wärme c der Rauchgase und den Temperaturbeobachtungen T und t läßt sich nach Dosch (a. a. O.) der Abwärmeverlust in vH des Heizwertes der Kohle berechnen nach der Gleichung

$$q_v = 0,11 c \varphi (T - t).$$

Mit $c = 0,33$ im Mittel und $t = 20^\circ \text{C}$ vereinfacht sich die Gleichung zu

$$q_v = \varphi (0,0363 T - 0,726).$$

Zur genauen Ermittlung des Schornsteinverlustes durch fühlbare Wärme bedarf es jedoch, außer der Bestimmung des Unverbrannten der Herdrückstände, sowohl einer Elementaranalyse des Brennstoffes wie einer genauen Analyse der Rauchgase; denn nur dann kann man das richtige Volumen und den Wärmeinhalt der Rauchgase berechnen. Außerdem darf die Aenderung der spezifischen Wärme der verschiedenen Rauchgasbestandteile (CO_2 , sogenannte permanente Gase, Wasserdampf) mit der Temperatur nicht außer Acht gelassen werden.

Unter Berücksichtigung der genannten Faktoren entwickelte Haier²⁾ folgende Formel:

$$W_2 = [(c_p)_g V_g + (c_p)_w G_w] (T - t) \text{ WE.}$$

Hierin bedeutet

- W_2 den Wärmeverlust durch die fühlbare Wärme (Abwärme),
- $(c_p)_g$ die spezifische Wärme der Rauchgase,
- V_g das Volumen der Rauchgase aus 1 kg Kohle in cbm,
- $(c_p)_w$ die spezifische Wärme des Wasserdampfes auf 1 kg,
- G_w das Gewicht des Wasserdampfes aus 1 kg Kohle in kg,
- T die Abgangtemperatur der Rauchgase,
- t die Temperatur der eintretenden Verbrennungsluft.

Wir selbst legten der Berechnung dieses Verlustpostens der Wärmebilanz folgende nach dem gleichen Grundsatz abgeleitete Formel zugrunde, worin die Symbole die auf S. 7 angegebene Bedeutung haben.

$$v_f = [c_p(\text{CO}_2) k_1' + c_p(p, g) (V_g - k_1') + c_p(\text{H}_2\text{O}) V_w] (T - t) \text{ WE.}$$

Haier hat aus den von Mallard und Le Chatelier bestimmten spezifischen Wärmen für Kohlensäure, Wasserdampf und permanente Gase Tafeln für die spezifische Wärme der Rauchgase mit verschiedenem Kohlensäuregehalt und verschiedener Temperatur berechnet und aus diesen die entsprechenden Zahlen genommen. Wir haben dagegen bei unsern Berechnungen die von Geipert³⁾ zusammengestellten Werte von Le Chatelier für die wahren spezifischen Wärmen von CO_2 , die sogenann-

¹⁾ Z. für Dampfkessel- und Maschinenbetrieb 1909 S. 507.

²⁾ Feuerungsuntersuchungen des Vereines für Feuerungsbetrieb und Rauchbekämpfung, Hamburg 1906 S. 20 u. f.

³⁾ Journ. f. Gasbel. u. Wasservers. 1906 S. 439.

ten permanenten Gase und den Wasserdampf benutzt. Daher kommt es, daß, obgleich das erste Glied der Formel von Haier anders aussieht, als das erste der unsrigen, beide dieselbe Bedeutung haben und sich nur in den Werten der spezifischen Wärmen unterscheiden. Beim zweiten Glied der Formel, wo Haier das Gewicht des aus 1 kg Kohle entstandenen Wasserdampfes in Rechnung setzt, wogegen wir mit dessen Volumen rechnen, berücksichtigt Haier nicht den Feuchtigkeitsgehalt der Verbrennungsluft, was allerdings für die Wärmebilanz nicht erheblich ins Gewicht fällt. Auch für genaue Wärmebilanzen genügt es, zwecks Berechnung des Wärmehaltes des Wasserdampfes (in kg ausgedrückt), daß man das Gewicht des gebildeten Wasserdampfes nach der Gleichung

$$G_w = \frac{9H+W}{100}$$

berechnet und die gefundene Zahl mit der veränderlichen spezifischen Wärme des Wasserdampfes multipliziert.

Von sonst richtigen Ueberlegungen ¹⁾ ausgehend, hat in jüngster Zeit Märcks eine Formel zur Berechnung des Schornsteinverlustes durch die fühlbare Wärme entwickelt, bei der behufs Berechnung des Rauchgasvolumens die Annahme zugrunde gelegt wird, daß der gesamte Kohlenstoff der Kohle zu CO₂ verbrenne, obgleich der Verfasser den Wärmeverlust durch unverbranntes Kohlenoxyd besonders in Rechnung setzt. Dieser Irrtum hat zur Folge, daß bei Versuchen, bei denen erhebliche Mengen unverbrannter Gase auftreten, nach dieser Rechnungsart die Wärmeverluste ebenso viel zu hoch ausfallen, wie bei abgekürzten Formeln, s. Zahlentafel 17.

Die mit den besprochenen Formeln berechneten Abwärmeverluste bei unsern Versuchen in Winterthur haben wir mit den gravimetrischen Rauchgasanalysen in nachfolgender Zahlentafel 17 vereint.

Daraus läßt sich ersehen, daß bei normaler Zusammensetzung der Rauchgase (rd. 1 vH unverbrannte Gase) die Näherungsformeln genügend genaue Werte geben. Ist die Verbrennung fast vollkommen (nicht mehr als 0,3 vH unverbrannte Gase), so ist die Siegertsche Formel sehr brauchbar; treten unverbrannte Gase in größerer Menge auf, so gibt namentlich die 2. Formel von Hassenstein recht gute Näherungswerte. Die Formel von Dosch führt in allen Fällen zu brauchbaren Werten. Die Abweichungen der Näherungswerte von den auf Grund der genauen Formeln berechneten werden um so größer, je mehr unverbrannte Gase auftreten. Die Nichtberücksichtigung letzterer in den abgekürzten Formeln hat jedoch zur Folge, daß die mit ihrer Hilfe gefundenen zu hohen Abwärmeverluste durch die Vernachlässigung des Wärmeverlustes durch unverbrannte Gase teilweise ausgeglichen werden.

In Zahlentafel 14 und 15 haben wir die nach verschiedenen Verfahren gefundenen Kohlensäuregehalte der Rauchgase zusammengestellt. Da das Volumen der Rauchgase aus 1 kg Kohle in erster Linie mit seinem Kohlensäuregehalt zusammenhängt, wird durch letzteren die Höhe des Verlustes durch fühlbare Wärme am meisten beeinflusst. Bestimmt man bei einem und demselben Versuch den Kohlensäuregehalt der Rauchgase nach verschiedenen Verfahren und findet dabei erhebliche Unterschiede, so berechnen sich daraus auch sehr verschiedene Abwärmeverluste, wie auch die Zahlentafel 18 zeigt.

Vergleicht man die in Zahlentafel 18 aus den nach verschiedenen Verfahren gefundenen Kohlensäuregehalten sich ergebenden Unterschiede mit den in Zahlen-

¹⁾ Fuchs, Formeln u. Tabellen der Wärmetechnik S. 3 u. f.; Brand, a. a. O.

Zahlentafel 17.

Berechnung der Abwärmeverluste (Verluste durch die fühlbare Wärme).

Feuerung mit Handbeschickung	aus der Zusammensetzung der Rauchgase					nach Sievert	nach Hassenstein 2. Gleichung	nach den Normen					nach Dosch $t=20^{\circ}\text{C}$, $C=0,33$	nach Märks	nach Haier	nach unserer Rechnungsweise
	CO ₂	CO	H	O	N			Kohlenstoff d. Analyse C	Kohlenstoff korrigiert	Modifikation Kaufhold	Modifikation Fredeking					
	vH	vH	vH	vH	vH			vH	vH	vH	vH	vH				
Ruhrpreßkohle Rosenblumendelle . .	11,42	0,55	0,24	8,47	79,31	17,3	16,1	17,8	17,2	17,6	17,2	17,2	17,6	16,2	16,6	
Ruhrfettkohle Deutscher Kaiser . .	11,30	1,01	0,76	7,01	79,92	17,3	15,4	17,8	16,9	17,5	17,2	16,2	17,3	15,3	15,4	
Ruhrflammkohle Dahlbusch . .	9,93	1,14	0,72	10,38	77,82	20,4	17,8	20,6	19,9	20,9	20,4	17,9	20,0	17,4	17,6	
Saarflammkohle Püttlingen . .	11,83	3,45	1,51	4,10	79,09	16,7	12,6	17,3	16,7	17,0	17,0	12,3	16,4	12,9	12,9	
Feuerung mit mechanischer Beschickung (Unterschub)																
Ruhrpreßkohle Rosenblumendelle . .	9,70	0,04	0,25	10,66	79,32	21,0	20,2	21,4	20,8	21,1	20,8	21,9	21,1	20,8	21,1	
Ruhrfettkohle Deutscher Kaiser . .	9,06	0,05	0,28	10,24	80,35	21,9	20,9	22,0	21,5	22,2	21,6	22,3	21,5	21,2	21,6	
Ruhrflammkohle Dahlbusch . .	10,34	0,02	0,32	10,07	79,25	20,4	19,7	20,6	20,2	20,9	20,5	20,4	20,2	20,4	20,6	
Saarflammkohle Püttlingen . .	10,21	0,03	0,27	10,60	78,86	20,2	19,5	20,6	20,1	20,8	20,7	20,5	19,9	20,1	20,3	

Zahlentafel 18.

Zusammenstellung der Abwärmeverluste (Verluste durch fühlbare Wärme) berechnet nach den Normen auf Grund verschiedener Kohlensäuregehalte der Rauchgase.

		Mittelwerte aus Durchschnittsproben						Mittelwerte der Momentanproben			
		Gasprobe nach Bunte		Gasprobe aus dem Gasometer über 50 vH Glycerin		Gasprobe aus dem Gasometer über rauchgesättigtem Wasser		1/4 stündliche Orsat-Analysen		Ados	
		CO ₂ vH	Verlust durch fühlbare Wärme vH	CO ₂ vH	Verlust durch fühlbare Wärme vH	CO ₂ vH	Verlust durch fühlbare Wärme vH	CO ₂ vH	Verlust durch fühlbare Wärme vH	CO ₂ vH	Verlust durch fühlbare Wärme vH
Ruhrpreßkohle Rosenblumendelle	Handbeschickung	11,4	17,8	—	—	10,8	18,4	13,1	15,6	12,7	16,1
	mechanische Beschickung	9,7	21,4	9,7	21,4	8,6	24,1	10,0	20,9	10,0	20,9
Ruhrfettkohle Deutscher Kaiser	Handbeschickung	11,3	17,8	—	—	10,6	18,8	11,4	17,8	11,8	17,0
	mechanische Beschickung	9,1	22,0	9,0	22,3	8,2	24,3	9,0	22,3	9,3	21,5
Ruhrflammkohle Dahlbusch	Handbeschickung	9,9	20,6	—	—	10,4	19,7	12,6	16,4	12,8	16,2
	mechanische Beschickung	10,3	20,6	10,1	21,0	9,9	21,4	10,9	19,6	10,9	19,6
Saarflammkohle Püttlingen	Handbeschickung	11,8	17,3	—	—	10,6	19,2	13,0	15,8	13,0	15,8
	mechanische Beschickung	10,2	20,6	9,8	21,4	9,6	21,8	10,6	19,8	10,8	19,4

tafel 17 enthaltenen, die von dem Berechnungsverfahren herrühren, so ergibt sich die Schlußfolgerung, daß die richtige Ermittlung des mittleren Kohlen-säuregehaltes der Rauchgase für die Berechnung des Abwärmeverlustes wichtiger noch als die Wahl der Rechnungsweise ist.

b) Berechnung der Wärmeverluste durch unverbrannte Gase.

Wie Bunte bei seinen Versuchen in der Heizversuchstation in München nachgewiesen hat, und wie wir schon erwähnten, darf man, ohne einen nennenswerten Fehler zu begehen, bei der Berechnung der Wärmeverluste durch die unverbrannten Gase annehmen, daß ihr gesamtter Kohlenstoff als Kohlenoxyd und sämtlicher Wasserstoff frei vorhanden wäre. Wir haben nach dem Beispiel von Bunte die Gehalte unsrer Rauchgase aus 1 kg Kohle an CO und H mit den entsprechenden Heizwerten (3046 und 2598 WE) multipliziert, während Haier die Summe beider Gase mit der Zahl 3000 WE vervielfacht, was praktisch zu gleichen Ergebnissen führt. Die Ermittlung des Kohlenoxydgehaltes eines Rauchgases mit Hilfe des Orsat-Apparates gestattet selbstverständlich nur die Berechnung des entsprechenden Wärmeverlustes.

Hassenstein (a. a. O.) hat zur Berechnung des Wärmeverlustes durch unverbrannte Gase, ausgedrückt in vH des Heizwertes der Kohle, die Formel

$$V_u = \frac{3046 k_2 + 8573 ch_4 + 2598 h}{17 + 15 (k_1 + k_2 + ch_4)}$$

aufgestellt, die recht brauchbare Näherungswerte gibt.

k_1 bedeutet den Kohlensäuregehalt	}	in vH der Rauchgase.
k_2 den Kohlenoxydgehalt		
ch_4 den Methangehalt		
h den Wasserstoffgehalt		

Die Anwendung dieser Gleichung bedingt die Ausführung einer vollständigen Rauchgasanalyse; dagegen braucht der Heizwert der Kohle nicht bekannt zu sein. Hierbei darf aber nicht übersehen werden, daß ohne Kenntnis der letzteren der Wirkungsgrad einer Feuerungsanlage nicht mit Sicherheit ermittelt werden kann. Ist aber der Heizwert bekannt, so lassen sich die Wärmeverluste durch unverbrannte Gase, wie eingangs gezeigt, auf einfachere Weise berechnen, als mit Hilfe der Hassensteinschen Gleichung.

c) Wärmeverluste durch die Herdrückstände.

Wie oben gezeigt, ergibt die Berechnung dieses Verlustpostens nach den Normen genügend genaue Werte, falls die Kohlen nicht abnorm hohe Aschengehalte aufweisen. Liegt ein solcher Fall vor, so sollte der Heizwert der Rückstände ermittelt und die von uns angegebene Rechnungsweise gewählt werden. Oft wird es auch schwer halten, die Gesamtmenge der Rückstände genau zu ermitteln (siehe den Versuch mit Penzberger Braunkohle S. 18).

d) Wärmeverluste durch Ruß.

Die Berechnung der Wärmeverluste durch Ruß geschieht in der auf S. 8 angegebenen Weise. Hassenstein (a. a. O.) berechnet auch diesen Verlustposten unter Ausschaltung des Heizwertes des Brennstoffes nach der Gleichung

$$v_r = \frac{100}{1,0 + 6,3 \frac{k_1 + k_2 + ch_4}{k_3}}$$

k_1, k_2, ch_4 sind die Werte für $\text{CO}_2, \text{CO}, \text{CH}_4$ in Volumhundertteilen des Rauchgases, k_3 bedeutet den Rußgehalt in g/cbm Rauchgas. Die so ermittelten Näherungswerte sind recht brauchbar.

e) Wärmeverluste durch Leitung und Strahlung.

Als Wärmeverlust durch Leitung und Strahlung bezeichnete man bisher, wie auch in dieser Abhandlung, den Unterschied der Summe sämtlicher Bilanzposten von Hundert. Dabei wurde vielfach angenommen, daß dieser Verlust ein für jede Kesselanlage bestimmter Festwert sei. Ja es wurde sogar häufig die Richtigkeit von Verdampfungsversuchen darnach beurteilt, ob das Restglied der Wärmebilanz stets gleich ausfiel oder nicht.

Haier (a. a. O.) hat bereits angegeben, daß der Betrag dieses Restgliedes bei Verfeuerung derselben Kohle in derselben Anlage mit der Belastung schwanke. Aus unsern Beobachtungen geht hervor, daß es bei derselben Anlage auch durch die Zusammensetzung der Kohlengattung beeinflusst wird. Da es, wie auch an andern Orten erwähnt, außerdem sämtliche Beobachtungs- und Berechnungsfehler einschließt, wäre es von hervorragendem Wert, ein Verfahren zu besitzen, um den Verlust durch Leitung und Strahlung — anstatt aus dem Unterschied — unmittelbar zu ermitteln.

Cario¹⁾ denkt sich den Strahlungsbetrag aus 2 Teilen bestehend: aus der Ausstrahlung im Stillstande, die unveränderlich ist, sowie aus einem zweiten Teile, der veränderlich und abhängig von der jeweiligen Belastung der Anlage ist. Die Stillstandsabkühlung läßt sich nach Cario für jede Anlage in der Weise bestimmen, daß während einer längeren Betriebszeit ohne Dampfenahme des Kessels, dessen Dampfdruck durch eine gemessene Wärmemenge (Heizelemente, Leuchtgas, Kohle) unverändert erhalten wird. Die Stillstandsabkühlung wird demnach ermittelt durch die zum Ausgleiche der Abkühlung des Kessels aufzuwendende Wärmemenge. Der veränderliche Teil des Strahlungsbetrages läßt sich jedoch nur als Restglied berechnen.

De Grahl²⁾ verfährt in der Weise, daß er den eben im Betrieb gewesenen Dampfkessel, nach Unterbrechung der Dampfleitung und Befreiung des Rostes vom Brennstoff bei abgeschlossenem Schieber und geschlossener Aschfallthür abkühlen läßt und dabei von Zeit zu Zeit Dampfdruck und Kesselhaustemperatur beobachtet. Wenn dann der Dampfdruck auf 0 zurückgegangen ist, wird der Kessel mit Wasser angefüllt, um damit den Inhalt des vordem bestandenen Dampf- und Flüssigkeitsraumes zu ermitteln, wobei die Temperatur des zugeführten Wassers zu messen ist. Ist der Inhalt des Kessels bestimmt, so läßt sich an Hand der Zahlentafeln in der »Hütte« für jeden Dampfdruck der Wärmeinhalt in WE berechnen. Betrag er beispielsweise W für einen Dampfdruck p , und W_1 für den innerhalb gewisser Zeit gefallenen Druck p_1 , so ist

$$dW = W - W_1$$

die in dieser Zeit durch Leitung und Strahlung verloren gegangene Wärmemenge. Bezeichnet ferner

F die Oberfläche des Kessels,

k den Koeffizienten für die Wärmeabgabe der Flächeneinheit für 1° Temperaturunterschied,

¹⁾ Z. f. Dampfkessel- und Maschinenbetrieb 1905 S. 171.

²⁾ Z. f. Dampfkessel- und Maschinenbetrieb 1909 Nr. 51; 1910 Nr. 4.

T_m die mittlere Temperatur im Innern des Kessels für den Spannungsabfall von p auf p_1 ,

t_m die mittlere Temperatur im Kesselhause,

so kann man für jedes Kesselsystem Fk aus

$$dW = Fk(T_m - t_m) \dots \dots \dots (7)$$

berechnen.

Andererseits ist aber auch

$$dW = Fk_2(T_v - t_m) \dots \dots \dots (8)$$

wobei T_v die Temperatur der Kesselverkleidung außen,

t_m die Temperatur des Kesselhauses, wie in Formel (7) bedeutet.

Hat man einmal für ein bestimmtes Kesselsystem Fk bzw. Fk_2 (die mit dem Dampfdruck wechseln) ermittelt, so läßt sich nach obigen Gleichungen der Wärmeverlust durch Leitung und Strahlung bei späteren Versuchen aus den Beobachtungen der Temperaturen des Dampfes, der Kesselteile und des Kesselhauses berechnen.

Sehr wünschbar wäre eine vergleichende Untersuchung an verschiedenen Kesselarten über die Beträge der Verluste durch Leitung und Strahlung ermittelt einerseits nach Cario und de Grahl, andererseits aus dem Restglied der Wärmebilanz.

V. Anhang.

a) Untersuchung von Feuergasen.

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, haben wir, um in den Verlauf der Verbrennung Einblick zu gewinnen, bei unsern Versuchen an dem schottischen Schiffskessel in Luzern die Zusammensetzung der an verschiedenen Stellen der Feuerung entnommenen Feuergase mit derjenigen der gleichzeitig gebildeten Rauchgase verglichen. In Fig. 4, S. 11, haben wir angedeutet, wie wir mittels einer sogenannten kaltwarmen Röhre nach Deville Gasproben über dem Rost und aus der Umkehrkammer entnahmen, während gleichzeitig durch ein gußeisernes Rohr die Rauchgase aus dem Fuchs abgesogen wurden. Die benutzten Devilleschen Röhren, für deren Anfertigung wir dem Werkstättenchef der Dampfschiffgesellschaft des Vierwaldstättersees, wie auch für seine sonstige werktätige Mithilfe bei unsern Versuchen zu bleibendem Danke verpflichtet sind, bestanden aus Messingröhren, Fig. 22 und 23. Um in verschiedenen Höhen über dem Roste die Gase absaugen zu

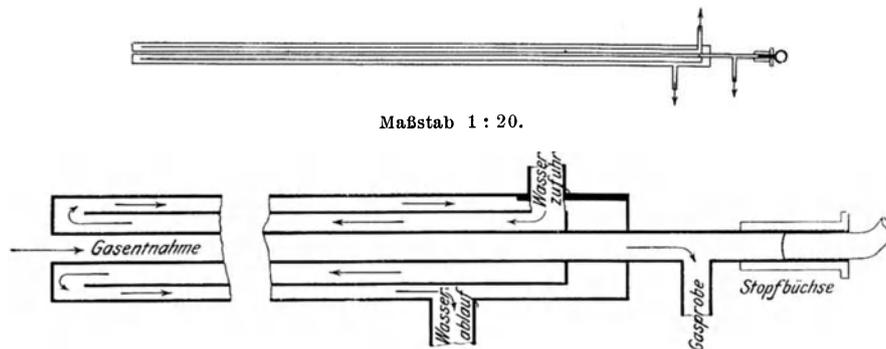


Fig. 22 und 23. Kaltwarme Röhre nach Deville zur Entnahme von Feuergasen. Maßstab 1 : 4.

können, wurde in der linken Feuertür ein Ausschnitt gemacht, s. a. Fig. 3 und 4, S. 11, durch den die wassergekühlte Röhre eingeführt wurde. An ihrem freien Ende ruhte die Röhre auf einer Krücke von feuerfestem Stein, und zwar so, daß die Absaugöffnung sich entweder 6, 12 oder 16 cm hoch über den Roststäben befand. Die Schichthöhe des Brennstoffes betrug bei allen Versuchen 12 cm und wurde durch regelmäßiges Aufgeben während der ganzen Versuchsdauer gleich erhalten. In der Umkehrkammer waren in entsprechender Höhe zwei Stehbolzen entfernt und durch eiserne Rohrstücke ersetzt worden, in welche durch das untere das kürzere Gasabsaugerohr und durch das obere ein Pyrometer für die Temperaturablesungen in der Umkehrkammer eingepaßt wurden. Die beiden kaltwarmen Röhren sowie das Rohr für die Fuchsgase waren durch dickwandige Bleileitungen mit den Gasbehältern zum Auffangen der Durchschnittsproben verbunden. Die Behälter befanden sich in einem zu diesem Zwecke besonders hergerichteten Beobachtungsraum des Kesselhauses, s. Fig. 24, in der nur 2 von den 3 Gasbehältern sichtbar sind.

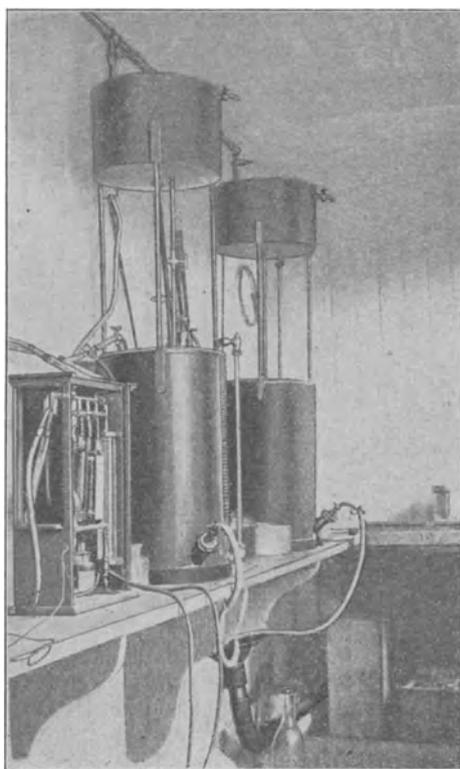


Fig. 24. Gasbehälter im Beobachtungsraum.

Bevor die Gase in die Bleileitungen eintraten, durchströmten sie ein Glaswollefilter. Durch Einschalten eines Dreiwegehahnes vor jedem Gasbehälter konnte sein Inhalt entweder in die Gasproberöhren für die genaue Analyse oder in den abgebildeten Orsat-Apparat übergeführt werden. Vor Beginn der Versuche wurden die Bleileitungen durch rasches Ansaugen von wenigstens 10 ltr des entsprechenden Gases gefüllt. Die Feuergase über dem Roste wurden in der Weise aufgefangen, daß je eine Stunde lang auf einer bestimmten Höhe rd. 30 ltr Gas mit gleichmäßiger Geschwindigkeit abgesaugt wurden, während gleichzeitig die Fuchsgase in einem besondern Gasbehälter aufgesammelt wurden.

Bei einer zweiten Versuchsreihe, die mit denselben Brennstoffen ausgeführt wurde, begnügten wir uns damit, die Feuergase 6 cm und 12 cm hoch über dem Roste zu entnehmen, saugten dafür aber während der ganzen Versuchsdauer außer den Fuchsgasen auch die Gase aus der Umkehrkammer ab. Da, wie schon hervorgehoben, bei allen unsern Versuchen die Schichthöhe des Brennstoffes an allen Stellen des Feuers auf 12 cm erhalten wurde, stammen die Gasproben, die bei 6 cm Höhe entnommen wurden, aus der Mitte der Brennstoffschicht, die bei 12 cm abgesaugten aus der Oberfläche und die bei 16 cm Höhe entnommenen aus dem Feuerraum über dem Roste.

In Zahlentafel 19 stellen wir die Ergebnisse der volumetrischen Analyse der aufgefangenen Feuergase mit denjenigen der gleichzeitig entwickelten Fuchsgase und den aus letzteren berechneten Luftüberschüssen zusammen.

Zahlentafel 19.
Zusammensetzung der Feuer- und Rauchgase. Versuche in Luzern.

	Entnahme- stelle	CO ₂	O ₂	CO	CH ₄	H ₂	Rest	Luft- über- schuß
1. Versuchsreihe.								
Gaskoks Luzern	6 cm	3,49	17,26	0,21	0,02	—	79,03	—
	16 »	15,84	3,32	2,35	0,05	—	78,42	—
	Fuchs	8,64	11,71	0,08	0,02	—	79,56	2,0
Ruhrpreß- kohlen V. G.	6 cm	14,28	4,68	1,51	0,90	0,75	77,71	—
	12 »	15,67	1,21	4,85	0,46	1,32	76,49	—
	16 »	12,54	0,56	10,55	0,56	2,72	72,99	—
Zeech Maria bei Höngen	Fuchs	12,76	6,37	0,27	—	—	80,81	1,43
Ober- rheinische Preßkohlen H. St.	6 cm	7,84	12,75	0,25	—	—	79,20	—
	12 »	13,34	4,57	3,25	0,15	0,69	78,04	—
	16 »	14,70	2,47	3,84	—	1,19	77,89	—
	Fuchs	9,60	9,89	0,23	0,05	—	80,35	1,86
Saar- fettkohlen Maybach	6 cm	3,71	16,05	0,62	—	—	79,69	—
	12 »	11,10	2,81	3,76	1,57	3,25	77,71	—
	16 »	11,54	2,41	4,40	2,17	2,68	76,92	—
	Fuchs	11,16	7,13	0,40	—	0,36	80,92	1,5
Saarfett- flammkohlen Friedrichs- thal	6 cm	5,91	14,37	0,87	—	—	78,96	—
	12 »	10,09	7,65	2,01	0,47	0,87	78,91	—
	16 »	13,01	4,48	3,20	0,61	0,81	77,90	—
	Fuchs	9,81	9,28	0,99	—	—	80,68	1,8
Saar- flamm- kohlen la Houve	6 cm	9,51	9,94	1,55	0,24	—	79,11	—
	12 »	8,05	0,39	20,44	0,60	2,94	67,75	—
	16 »	14,67	1,67	4,45	0,39	1,30	77,60	—
	Fuchs	10,80	5,27	4,41	0,83	0,78	77,83	1,4
2. Versuchsreihe.								
Gaskoks Luzern	6 cm	6,69	14,03	0,27	0,04	—	78,99	—
	12 »	17,21	2,49	1,57	0,19	—	78,59	—
	16 »	12,38	7,97	0,43	0,02	0,17	79,09	—
	Umkehrk. Fuchs	6,31 4,90	14,46 15,93	— 0,09	— 0,02	— —	79,29 79,14	3,2 4,0
Ober- rheinische Preßkohlen H. St.	6 cm	11,81	8,47	0,88	0,12	0,02	78,70	—
	16 »	14,67	0,73	6,09	0,96	2,12	75,49	—
	Umkehrk. Fuchs	11,73 10,07	7,12 9,13	0,60 0,28	0,13 —	— —	80,45 80,50	1,5 1,63
Saar- fettkohlen Maybach	6 cm	8,76	11,20	0,74	0,35	—	79,32	—
	16 »	13,54	4,54	1,04	0,92	—	80,31	—
	Umkehrk. Fuchs	11,08 8,51	7,72 10,77	0,82 0,17	— 0,15	0,22 —	80,24 80,89	1,6 2,0
Saar- flamm- kohlen la Houve	6 cm	11,01	8,10	1,78	0,42	0,17	78,39	—
	16 »	13,61	5,42	1,11	0,31	—	79,71	—
	Umkehrk. Fuchs	11,04 6,54	7,70 13,04	0,79 0,39	0,12 0,03	0,07 0,20	80,36 79,91	1,5 2,6

Ein Vergleich mit den Ergebnissen der ersten Versuchsreihe läßt erkennen, daß der Kohlensäuregehalt mit dem Hindurchstreichen der Verbrennungsluft durch die Brennschicht von unten nach oben zunimmt und daß sich der Sauerstoffgehalt entsprechend verringert. Sobald die Abnahme des Sauerstoffgehaltes so bedeutend wird, daß die Entgasungserzeugnisse des Brennstoffes nicht mehr am Entstehungsorte verbrennen können, entstehen Gase, die Kraftgasen ähnlicher sind als Rauchgasen. Je nach der Natur des Brennstoffes ist die Entgasung örtlich verschieden. In keinem Falle fanden wir 16 cm über dem Rost vollständig verbrannte Gase. Wir möchten nicht unterlassen, hervorzuheben, daß unsre Feuergasproben während je einer Stunde einer bestimmten Stelle der Feuerung entnommen wurden, und daß demgemäß ihre Zusammensetzung mehr von der mittleren Zusammensetzung der insgesamt entwickelten Feuergase der entsprechenden Brennschicht abweichen kann, als die Zusammensetzung der während 3 Stunden abgesaugten Rauchgasproben vom Mittel der gesamten Rauchgase. Bei der zweiten Versuchsreihe, für die wiederum die Höhe der Brennschicht stets 12 cm betrug, wurde alle 5 Minuten Kohle aufgegeben. Wie man sieht, treten bei dieser Reihe in keinem Falle so erhebliche Mengen unverbrannter Gase auf, wie bei der ersten, was davon herrühren wird, daß hier mit größerem Luftüberschuß gefeuert wurde als vorher. Man erkennt weiter, daß in allen Fällen hinter der Umkehrkammer keine Verbrennung mehr stattfindet. Die Zunahme des Luftüberschusses bei den Fuchsgasen scheint darauf hinzudeuten, daß auch in der Umkehrkammer noch keine vollständige Mischung der Rauchgase stattgefunden habe.

Als diese Versuche angestellt wurden (Nov. und Dez. 1905), lagen unsres Wissens keine Literaturangaben über die Zusammensetzung von Feuergasen vor. Seitdem sind in der von uns bereits angeführten Veröffentlichung von Breckenridge eine Anzahl Analysen von Feuergasen mitgeteilt worden, und zwar entnommen auf der Oberfläche der Brennschicht, bei denen sich auch Kohlenoxydgehalte von 17,9 vH, 20,3 vH und 23,8 vH vorfinden.

b) Ueber das Verhalten des Schwefels der Kohle beim Verbrennen auf dem Rost und über den Schwefelgehalt der Rauchgase.

Bei der Kohlenanalyse unterscheidet man zwischen dem Gesamtschwefel und dem sogenannten verbrennlichen Schwefel einer Kohle, d. h. demjenigen Anteil des Gesamtschwefels, der bei der Verbrennung der Kohle in der Gasmuffel oder im Verbrennungsrohr gasförmig entweicht. Dieser Anteil läßt sich nach der Sauerischen Verfahren¹⁾ direkt bestimmen. Bei der Verbrennung der Kohle entweicht jedoch nicht nur der »organische« Schwefel der eigentlichen Kohlensubstanz, sondern auch ein größerer oder geringerer Teil des vorhandenen anorganischen Schwefels. Ist, wie zumeist, Schwefelkies als Begleitkörper der Kohlensubstanz zugegen, so wird dieser beim Verbrennen abgeröstet. Wenn nun zwei Kohlen gleich viel organischen und Kiesschwefel enthalten, so ist damit noch nicht gesagt, daß sie beim Verbrennen im Kleinen sowie im Großen gleich viel verbrennlichen Schwefel abgeben; denn die Menge des letzteren ist einerseits von den Verbrennungsbedingungen, anderseits von der Zusammensetzung der Mineralsubstanz der Kohlen abhängig. Enthält, was häufig vorkommt, eine Asche freie Basen, z. B. aus Karbonaten, deren Kohlensäure beim Verbrennen ausgetrieben worden ist, so wird weit mehr Schwefel in der Asche zurückbleiben, als wenn dies nicht der Fall ist. Wel-

¹⁾ vergl. Holliger, Zur Schwefelbestimmung in Kohlen und Koks, Z. angew. Chemie 1909 S. 436, 493 u. f.

chen Einfluß aber die Umstände bei der Verbrennung selbst ausüben, lehrt ein Beispiel, das Langbein¹⁾ anführt: Bei der Veraschung von Briketts, die mit Kalkzusatz hergestellt waren, wurde bei der Verbrennung im Platintiegel der ganze Schwefel gebunden; demzufolge war hier kein verbrennlicher Schwefel vorhanden; bei der Verbrennung in einer Feuerungsanlage dagegen wurde stets ein Teil des Schwefels frei, wie die Untersuchung der Rauchgase und die Kontrolle durch Untersuchung der Herdrückstände ergab. Wie Gräfe²⁾ nachwies, kann bei der Verbrennung von Braunkohlen der Schwefel in der Asche in Form von Sulfiden, Sulfaten und sogar als freier Schwefel vorhanden sein. Der Betrag des verbrennlichen Schwefels wird also von äußeren Umständen stark beeinflusst. Immerhin geht aus der Arbeit von Holliger (a. a. O.) und aus weiteren Erfahrungen in diesem Laboratorium (vergl. Zahlentafel 20) hervor, daß man für Kohlen mit normalem Aschen- und einem Gesamtschwefelgehalt von 1 bis 2 vH für den verbrennlichen Schwefel bei der Analyse Werte erhält, die nur etwa 0,1 bis 0,2 vH tiefer ausfallen, als diejenigen für den Gesamtschwefel. Liegen hingegen schwefelreiche Kohlen vor, so kann allerdings der Unterschied zwischen beiden Werten groß werden, so beträgt er z. B. bei den Penzberger Braunkohlen mit 5 vH Schwefel über 1 vH. Um festzustellen, wie sich im allgemeinen der im Laboratorium ermittelte Gehalt an verbrennlichem Schwefel zu dem bei Feuerungsversuchen gefundenen verhalte, haben wir bei unseren Verdampfungsversuchen in Speicher und in Winterthur und bei Heizversuchen an einer Zentralheizung die verwendeten Brennstoffe auf den Gesamtschwefelgehalt und auf ihren verbrennlichen Schwefel untersucht sowie ferner den Gesamtschwefelgehalt der Herdrückstände ermittelt. Zur Untersuchung kamen Steinkohlen aus dem Saar- und dem Ruhrgebiet, Ruhrbriketts, Bayerische Molassekohle und Gaskoks.

Zunächst muß bemerkt werden, daß es nicht immer möglich war, das Gewicht der Herdrückstände richtig zu bestimmen. So waren z. B. bei dem Versuche mit Bayerischer Molassekohle große Verluste durch fortgerissenen Flugstaub entstanden. Um einen ungefähren Anhalt über die Größe dieser Verluste zu haben, stellen wir in Zahlentafel 20 die in der Gasmuffel ermittelten Aschengehalte der Kohlen mit denjenigen der Herdrückstände, ausgedrückt in Prozenten der Kohle, zusammen. Wie man sieht, findet man in der Feuerung stets weniger Asche (d. h. Unverbrennliches der Herdrückstände) als in der Muffel. Dies rührt nicht nur davon her, daß der Flugstaub mineralische Bestandteile entführt, sondern auch davon, daß die Mineralsubstanz der Kohle auf dem Rost in anderer Weise verändert wird als in der Muffel. Zweifellos spielt hier die Veraschungstemperatur mit, ähnlich wie bei Versuchen von Langbein³⁾, der nachwies, daß bei der Verbrennung von Kohlen in der kalorimetrischen Bombe in verdichtetem Sauerstoff niedrigere Aschengehalte gefunden werden, als bei der Veraschung an der Luft im Platintiegel.

Aus dem Verhältnis des Gewichtes der Herdrückstände zu dem Gewichte der verfeuerten Kohle und aus dem Gehalte der Herdrückstände sowie demjenigen der Kohle an Gesamtschwefel fanden wir, daß bei Kohlen mit einem Schwefelgehalte von nicht über 2 vH sozusagen der gesamte Schwefel flüchtig ist (vergl. Zahlentafel 20). Zur Erläuterung unserer Rechnungsweise führen wir folgendes Beispiel an:

¹⁾ Post, Chemisch-technische Analyse, III. Aufl. Bd. I S. 43.

²⁾ Gräfe, Ueber chemische Vorgänge in den Braunkohlenaschen. Braunkohle, V. Jahrg. Nr. 32.

³⁾ Z. ang. Chem. 1900.

Verdampfungsversuch mit Ruhrkohle »Deutscher Kaiser«
(vergl. Zahlentafel 9).

Gesamtschwefel der Kohle 0,99 vH Gewicht der verfeuerten Kohle . . 1543 kg
 verbrennlicher Schwefel
 der Kohle 0,89 » » » Herdrückstände . . . 108 »
 Schwefelgehalt der Asche 0,10 vH

Gesamtschwefel der Herdrückstände 0,407 vH;
 macht für 108,0 kg 0,440 kg Schwefel = 0,029 vH der Kohle

Brennbares der Herdrückstände 28,9 vH; macht
 für 108 kg 31,2 vH mit 1 vH S 0,312 » »

Folglich: Mineralsubstanz
 der Herdrückstände . 76,8 kg mit 0,128 kg » = 0,008 vH »

Wir stellen nunmehr in folgender Zahlentafel 20 die Ergebnisse von 5 Versuchsreihen zusammen und führen darin auf:

Zahlentafel 20.

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Versuchsreihe	Bezeichnung der Brennstoffe	Gesamtschwefel der Brennstoffe	verbrennlicher Schwefel der Brennstoffe	nicht flüchtiger Schwefel der Brennstoffe	Gesamtschwefel der Herdrückstände der Brennstoffe	Schwefelgehalt der mineralischen Bestandteile der Herdrückstände der Brennstoffe	unmittelbar ermittelter Aschengehalt der Brennstoffe	aus den Herdrückständen ermittelter Aschengehalt der Brennstoffe
		vH	vH	vH	vH	vH	vH	vH
Verdampfungsversuche am Zweiflammrohrkessel im Kesselhaus I. Gebr. Sulzer, Winterthur. Planrostinnenfeuerung mit Handbeschickung (s. Zahlentafel 1 und 2)	Ruhrnußkohlen Deutscher Kaiser } 0,98	0,81	0,17	0,05	0,01	7,35	7,18	
	Ruhrbriketts Rosenblumendelle } 1,01	0,86	0,15	0,05	0,01	8,05	6,55	
	Ruhrkohlen Dahlbusch } 0,79	0,73	0,06	0,02	0,002	3,97	2,53	
	Saarstückkohlen Püttlingen } 1,18	0,97	0,21	0,04	0,03	7,44	5,80	
Verdampfungsversuche am Zweiflammrohrkessel im Kesselhaus I. Gebr. Sulzer, Winterthur. Planrostinnenfeuerung mit mechanischer Unterschubbeschickung (s. Zahlentafel 8 und 9)	Ruhrnußkohlen Deutscher Kaiser } 0,99	0,90	0,09	0,03	0,01	5,82	4,98	
	Ruhrbriketts Rosenblumendelle } 1,00	0,88	0,12	0,04	0,03	8,75	8,16	
	Ruhrkohlen Dahlbusch } 0,79	0,73	0,06	0,02	0,01	4,21	2,95	
	Saarstückkohlen Püttlingen } 1,06	0,88	0,18	0,03	0,02	7,35	5,91	
	Kokssand	1,55	1,07	0,48	0,05	0,01	14,78	5,41 ¹⁾
Verdampfungsversuche am Zweiflammrohrkessel im Kesselhaus I. Gebr. Sulzer, Winterthur	Bayer. Molassekohle Penzberg } 5,24	4,12	1,12	0,33	0,12	10,83	5,99 ¹⁾	
	Bayer. Molassekohle Penzberg } 5,40	4,11	1,29	0,42	0,22	11,02	8,13	
Verdampfungsversuche in Speicher am Zweiflammrohrkessel mit Planrostinnenfeuerung mit Handbeschickung (s. Zahlentafel 4 u 5)	Bayer. Molassekohle Penzberg } 4,83	3,73	1,10	0,16	0,05	12,28	1,98	
	Saarkohle Klein-Rosseln } 0,95	0,88	0,07	0,07	0,05	8,25	6,50	
Heizversuche an einer Zentralheizung	Gaskoks	1,36	1,13	0,23	0,08	0,05	12,23	9,42
	Gaskoks	0,79	0,61	0,18	0,10	0,07	14,61	9,93

¹⁾ Große Verluste durch mitgerissene Flugasche.

1) die Gehalte der Kohlen an Gesamtschwefel, flüchtigem und nicht flüchtigem Schwefel;

2) die Gehalte der Herdrückstände an gesamttem sowie an mineralischem Schwefel, ausgedrückt in Hundertteilen der Kohlen;

3) die unmittelbar ermittelten Aschengehalte der Kohlen nebst den aus den Herdrückständen berechneten.

Aus obiger Zahlentafel wird ersichtlich, daß bei Kohlen mit normalem Schwefelgehalte (nicht über 2 vH) und einem Aschengehalt von nicht über 10 vH die Werte für den gesamten und diejenigen für den verbrennlichen Schwefel höchstens um 0,2 vH voneinander abweichen. Bei schwefelreichen Kohlen hingegen können bedeutende Unterschiede vorkommen. Bei allen Kohlen bleibt jedoch in den Herdrückständen ein so geringer Teil des Gesamtschwefels zurück, daß dessen Betrag vernachlässigt werden kann. Auf dem Rost entweicht demnach fast der gesamte Schwefel und nicht nur der sogenannte verbrennliche Anteil.

Für die Beurteilung fester Brennstoffe ist deshalb der gesamte Schwefelgehalt zu berücksichtigen. Bei der Elementaranalyse hat man jedoch zu unterscheiden, ob schwefelreiche Kohlen oder schwefelarme vorliegen. Bei letzteren kann man, ohne einen nennenswerten Fehler zu begehen, den Gesamtschwefel in der Analyse aufzuführen. Bei schwefelreichen Kohlen dagegen darf bei der Elementaranalyse als Schwefelgehalt nur der mittelbar oder unmittelbar bestimmte verbrennliche Schwefel angegeben werden. Setzt man für diesen den Gesamtschwefel in Rechnung, wovon ein Teil in der Asche mitgewogen wurde, so findet man infolgedessen den nur aus der Differenz von Hundert bestimmbareren Sauerstoffgehalt zu niedrig.

Bei unseren Versuchen in Winterthur haben wir mit einem Ansauger besondere Rauchgasproben zur Untersuchung auf den Schwefelgehalt entnommen. Die Rauchgase durchströmten zu diesem Zwecke vor Eintritt in den Ansauger ein mit Bromwasser beschicktes Zehn-Kugelrohr in der die schweflige und die Schwefelsäure aufgefangen wurden. Bei der ersten Versuchsreihe entnahmen wir die Rauchgase der Hauptleitung c, Fig. 18. Die feuchten Gase hatten also, wenn auch in schnellem Strom, ein langes Eisenrohr zu durchstreichen; es konnte demnach unter Umständen das Eisen durch die Rauchgase angegriffen werden, und wir fanden auch nur einen kleinen Teil des zu erwartenden Schwefelgehaltes wieder. Bei der zweiten Versuchsreihe saugten wir deshalb, wie in Fig. 18 angedeutet, die Gase durch eine mit Glaswolle (als Rußfänger) gefülltes Rohr aus schwer schmelzbarem Glas ab, welches durch eine ganz kurze Glasröhre mit dem, mit Bromwasser beschickten, Zehn-Kugelrohr verbunden war. Durch besondere Versuche stellten wir fest, daß unter diesen Umständen keine schweflige Säure von der Glaswolle zurückgehalten wird. Aber auch mit dieser Versuchsanordnung gelang es uns in keinem einzigen Falle, den berechneten Schwefelgehalt der Rauchgase zu finden. Die folgende Zahlentafel 21 zeigt das Verhältnis der theoretischen zu den gefundenen Schwefelgehalten (ausgedrückt in Hundertteilen SO_2).

Aus obiger Zusammenstellung geht hervor, daß, wie auch von anderen Autoren erwähnt wurde (vergl. Herbig, Z. angew. Chemie 1909 S. 1882 u. f.), der Schwefelgehalt der Rauchgase so gering ist, daß er auch bei der gravimetrischen Bestimmung der Kohlensäure vernachlässigt werden kann.

Ueber den Verbleib des fehlenden Schwefels verweisen wir zunächst auf eine Veröffentlichung von Dennstedt und Haßler¹⁾, welche nachwies, daß im

¹⁾ Chem. Zeitg. 1907.

Zahlentafel 21.

		Schwefelgehalte der Rauchgase		Verluste	
		berechnet aus der Analyse der Kohlen u. Herdrückstände und der Rauchgasvolumen SO ₂ in Vol. vH	in den Rauchgasen bestimmt SO ₂ in Vol. vH	SO ₂ in Vol. vH	SO ₂ in vH des theoretischen Wertes
I. Versuchsreihe	Ruhrkohle Deutscher Kaiser	0,058	0,013	0,045	77,6
	Ruhrbriketts Rosenblumendelle	0,056	0,014	0,042	75,0
	Ruhrkohlen Dahlbusch	0,043	0,007	0,036	83,7
	Saarkohlen Püttlingen	0,100	0,015	0,085	85,0
II. Versuchsreihe	Ruhrkohle Deutscher Kaiser	0,041	0,017	0,024	58,4
	Ruhrbriketts Rosenblumendelle	0,043	0,027	0,016	37,2
	Ruhrkohlen Dahlbusch	0,037	0,005	0,032	86,5
	Saarkohlen Püttlingen	0,057	0,027	0,030	52,7

Kaminruß beträchtliche Mengen von schwefelsaurem Ammoniak enthalten sein können. Sie fanden im Ruß von Hauskaminen der Stadt Hamburg 1,9 bis 26,2 vH, im Mittel 12,9 vH Ammonsulfat.

Um einen Anhalt über den Betrag der durch den Flugstaub bedingten Schwefelverluste zu gewinnen, nahmen wir von dem während einer längeren Betriebsperiode in den Heizkanälen des Versuchskessels aufgesammelten Flugstaub eine Durchschnittsprobe, deren Zusammensetzung war:

Asche	87,7 vH
Wasser	0,8 »
brennbare Bestandteile	11,5 »
	<u>100,0 vH</u>

Diese enthielt:

	als S berechnet	als SO ₃ berechnet
Gesamtschwefel	1,27 vH	3,17 vH
verbrennlichen Schwefel	1,23 »	3,07 »
wasserlöslichen Schwefel	0,87 »	2,17 »

Die Schwefelsäure in der Flugasche war hauptsächlich an Kalzium gebunden, denn der wasserlösliche Auszug enthielt 1,67 vH CaO. Ammoniak konnte nur in Spuren nachgewiesen werden.

Aus Zahlentafel 21 ist ersichtlich, daß wir bei 8 Versuchen in 7 Fällen den Schwefelgehalt der Rauchgase um mehr als 50 vH niedriger finden, als dem Schwefelgehalte der verfeuerten Kohlen und der gefundenen Herdrückstände entsprach. Den Verbleib der Hauptmenge des Kohlenschwefels gelang es uns nicht nachzuweisen¹⁾.

¹⁾ Bei einer spätern Versuchsreihe mit dem oben erwähnten schottischen Schiffskessel, wo kein Mauerwerk vorhanden war, fanden wir den Gesamtschwefel der Kohle in Verbrennungsprodukten wieder.

VI. Zusammenfassung.

Die hauptsächlichlichen Ergebnisse unsrer Versuche, die sich über einen Zeitraum von 3 Jahren erstreckt haben, fassen wir wie folgt zusammen:

1) Bei Innenfeuerung mit Planrost geben — bei reichem Gehalte an brennbarer Substanz — Brennstoffe mit 16 bis 23 vH flüchtigen Bestandteilen die beste Verdampfung.

2) Beim Aufstellen von Wärmebilanzen ist zu unterscheiden zwischen Verbrennungen, bei denen erhebliche Mengen unvollständig verbrannter Gase auftreten, und solchen, bei denen dies nicht der Fall ist.

Im ersteren Falle muß man durch genaue Gasanalyse den Betrag der unvollständig verbrannten Gase ermitteln sowie unter Zugrundelegung genauer Formeln den gesamten Schornsteinverlust berechnen. Sind keine erheblichen Mengen unvollständig verbrannter Gase vorhanden, so kann man den Abwärmeverlust mit Benutzung abgekürzter Formeln genügend genau ermitteln. In allen Fällen ist die genaue Ermittlung des mittleren Kohlensäuregehaltes der Rauchgase unumgänglich notwendig, was nur durch Untersuchung richtig erhobener Durchschnittsproben geschehen kann.

3) Feste Brennstoffe werden auf dem Planrost mit Handbeschickung und Luftzuführung von unten ohne künstlichen Zug in keinem Falle vollständig verbrannt.

Wir glauben berechtigt zu sein, diese Versuchsergebnisse für allgemein gültig zu halten, weil sie an ganz verschiedenen Orten unter sehr verschiedenen Bedingungen gefunden worden sind.

Die Ausführung unsrer Versuche wäre uns nicht möglich gewesen ohne das große Entgegenkommen und die schätzenswerte Unterstützung, die uns von den Besitzern der benutzten Anlagen und deren Ingenieuren gewährt wurde. Es ist uns daher eine angenehme Pflicht, auch an dieser Stelle unsern verbindlichsten Dank auszusprechen den Herren: Dr. J. A. Strupler, Oberingenieur des Schweizerischen Vereines von Dampfkesselbesitzern, sowie dessen Ingenieuren, den Herren A. O. Strupler und F. Schäfer; Hrn. Direktor Schmid und Hrn. Werkstättenchef Meury von der Dampfschiffahrtsgesellschaft des Vierwaldstättersees in Luzern; den Herren Altherr und Zürcher in Speicher; den Herren Gebrüder Sulzer sowie Hrn. Ingenieur Walther und Hrn. Schaltegger in Winterthur. Bei unsern dortigen Versuchen hat uns Hr. Dr. M. Holliger, Assistent der Eidg. Prüfungsanstalt für Brennstoffe, aufs wirksamste unterstützt, wofür wir ihm gleichfalls bestens danken.

Zürich im März 1910.

Sonderabdrücke aus der Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure,

die in folgende Fachgebiete eingeordnet sind:

- | | |
|--|--|
| 1. Bagger. | 15. Gesundheitsingenieurwesen (Heizung, Lüftung, Beleuchtung, Wasserversorgung und Abwässerung). |
| 2. Bergbau (einschl. Förderung und Wasserhaltung). | 16. Hebezeuge (einschl. Aufzüge). |
| 3. Brücken- und Eisenbau (einschl. Behälter). | 17. Kondensations- und Kühlanlagen. |
| 4. Dampfkessel (einschl. Feuerungen, Schornsteine, Vorwärmer, Überhitzer). | 18. Kraftwagen und Kraftboote. |
| 5. Dampfmaschinen (einschl. Abwärmekraftmaschinen, Lokomobilen). | 19. Lager- und Ladevorrichtungen (einschl. Bagger). |
| 6. Dampfturbinen. | 20. Luftschiffahrt. |
| 7. Eisenbahnbetriebsmittel. | 21. Maschinenteile. |
| 8. Eisenbahnen (einschl. Elektrische Bahnen). | 22. Materialkunde. |
| 9. Eisenhüttenwesen (einschl. Gießerei). | 23. Mechanik. |
| 10. Elektrische Kräfteerzeugung und -verteilung. | 24. Metall- und Holzbearbeitung (Werkzeugmaschinen). |
| 11. Elektrotechnik (Theorie, Motoren usw.). | 25. Pumpen (einschl. Feuerspritzen und Strahlapparate). |
| 12. Fabrikanlagen und Werkstatteinrichtungen. | 26. Schiffs- und Seewesen. |
| 13. Faserstoffindustrie. | 27. Verbrennungskraftmaschinen (einschl. Generatoren). |
| 14. Gebläse (einschl. Kompressoren, Ventilatoren). | 28. Wasserkraftmaschinen. |
| | 29. Wasserbau (einschl. Eisbrecher). |
| | 30. Meßgeräte. |

Einzelbestellungen auf diese Sonderabdrücke werden gegen Voreinsendung des in der Zeitschrift als Fußnote zur Überschrift des betr. Aufsatzes bekannt gegebenen Betrages ausgeführt.

Vorausbestellungen auf sämtliche Sonderabdrücke der vom Besteller ausgewählten Fachgebiete können in der Weise geschehen, daß ein Betrag von etwa 5 bis 10 M eingesandt wird, bis zu dessen Erschöpfung die in Frage kommenden Aufsätze regelmäßig geliefert werden.

Zeitschriftenschau.

Vierteljahrsausgabe der in der Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure erschienenen Veröffentlichungen 1898 bis 1910.

Preis bei portofreier Lieferung für den Jahrgang

3,— M für Mitglieder

10,— M für Nichtmitglieder.

Seit Anfang 1911 werden von der Zeitschriftenschau der einzelnen Hefte einseitig bedruckte gummierte Abzüge angefertigt.

Der Jahrgang kostet

2,— M für Mitglieder.

4,— M für Nichtmitglieder.

Portozuschlag für Lieferung nach dem Ausland 50 Pfg für den Jahrgang. Bestellungen, die nur gegen vorherige Einsendung des Betrages ausgeführt werden, sind an die **Redaktion der Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, Berlin NW., Charlottenstraße 43** zu richten.

Mitgliederverzeichnis d. Vereines deutscher Ingenieure.

Preis 2,50 M. Das Verzeichnis enthält die Adressen sämtlicher Mitglieder sowie ausführliche Angaben über die Arbeiten des Vereines.

Bezugsquellen.

Zusammengestellt aus dem Anzeigenteil der Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure. Das Verzeichnis erscheint zweimal jährlich in einer Auflage von 35 bis 40000 Stück. Es enthält in deutsch, englisch, französisch, italienisch und spanisch ein alphabetisches und ein nach Fachgruppen geordnetes Adressenverzeichnis. Das Bezugsquellenverzeichnis wird auf Wunsch kostenlos abgegeben.